

VŠB – Technická Univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Použití Smoke analýzy v simulačním prostředí OrCAD/PSpice
Utilization of Smoke analysis in the Simulation Environment
OrCAD/PSPICE

Zadání bakalářské práce

Student:

David Spurný

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612R003 Aplikovaná elektronika

Téma:

Použití Smoke analýzy v simulačním prostředí OrCAD/PSpice
Utilization of Smoke Analysis in the Simulation Environment
OrCAD/PSpice

Zásady pro vypracování:

1. Popište vlastnosti a možnosti použití rozšířených typů analýz v prostředí OrCAD/PSpice.
2. Podle pokynů vedoucího bakalářské práce demonstруйте použití analýzy namáhání součástek (Smoke analysis) na jednoduchých příkladech.
3. Sestavte laboratorní úlohu včetně vzorového protokolu se zaměřením na použití Smoke analýzy v prostředí OrCAD/PSpice.

Seznam doporučené odborné literatury:

PSpice® Advanced Analysis User's Guide

<http://ecee.colorado.edu/~ecen4827/spice/pspice/pspaugca.pdf>

<http://www.orcad.com/resources/library/smoke-analysis>

Kolka, Z. Analýza elektronických obvodů programem OrCAD PSpice. Brno: VUT
Brno, <http://user.unob.cz/biolek/vyukaVUT/skripta/PSPICE.pdf>

Biolek, D. Modelování a simulace v mikroelektronice. Brno: VUT Brno, 2005
http://user.unob.cz/biolek/vyukaVUT/skripta/PSPICE_v_kostce.pdf

Další tituly doporučené literatury dle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Aleš Havel, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 07. 05. 2015

..... David Lepš


Podpis autora

Poděkování

Rád bych zde poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ph.D. Aleši Havlovi, Ing. Za jeho užitečné rady, podnětné náměty, věnovaný čas strávený při konzultacích a vědomostní obohacení získané v průběhu bakalářského studia.

Dále bych rád poděkoval své rodině, přátelům a kolegům, kteří mi byli cennou oporou a tvůrci příjemného prostředí za mou dobu studia.

Rovněž bych rád poděkoval všem členům katedry Elektroniky, jejichž pedagogická činnost mne vědomostně obohatila.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je popsání Smoke analýzy, tedy analýzy namáhání součástek v prostředí OrCAD/PSpice. Všechny elektronické součástky, které jsou protékány elektrickým proudem, jsou namáhány. Úkolem Smoke analýzy je porovnávání hodnot naměřených fyzikálních veličin s maximálními parametry součástek, které se nastavují v PSpice Model Editoru nebo v Property Editoru.

V první části je pojednáváno o všech dostupných analýzách, které lze v prostředí PSpice použít. Ve druhé části je použití Smoke Analýzy demonstrováno na dvou různých zapojeních. V posledním bodě je sestavena laboratorní úloha, včetně vzorového protokolu se zaměřením na použití Smoke analýzy.

Klíčová slova

Smoke, analýza, OrCAD/PSpice, PSpice Model Editor, Property Editor, maximální

Abstract

The purpose of this work is to describe the Smoke analysis – analysis of stressing parts in OrCAD/PSpice environment. All electronic parts which are flown by electrical current are stressed. The goal of Smoke analysis is to compare measured values with maximal parameters of electronic parts, which can be set in PSpice Model Editor or Property Editor.

The first part of this work discusses all available analyses, which can be used in PSpice. The usage of Smoke analysis is demonstrated on two different schematics in the second part. The laboratory task including a model report with focus on using Smoke analysis is assembled in the last part of this work.

Key words

Smoke, analysis, OrCAD/PSpice; PSpice Model Editor; Property Editor; maximal

Seznam použitých zkratk

<i>Veličina</i>	<i>Popis, vysvětlení</i>
AC	Střídavý
Average, AVG	Střední hodnota
C	Kondenzátor
D	Dioda
DC	Stejnoseměrný
L	Indukčnost
LED	Světlo vyzařující dioda
M	MOSFET tranzistor
MESFET	Tranzistor se strukturou MES
MOCs	Maximum Operating Conditions
MOSFET	Tranzistor se strukturou MOS
OrCAD/PSpice	Simulační software
out	Výstupní textový soubor
Peak	Špičková hodnota
Pulse	Střída čtyřkvadrantového měniče
Q	Tranzistor se strukturou BJT
R	Rezistor
RMS	Efektivní hodnota
Rz	Odpor funkce Parametric Sweep
SMD	Surface Mount Device
SOLs	Safe Operating Limits
TNOM	Globální proměnná
U	Napěťový stabilizátor
V	Zdroj napětí
VA	Voltampérová

Seznam použitých symbolů a fyzikálních veličin

<i>Veličina</i>	<i>Popis, vysvětlení</i>	<i>Jednotka</i>
CBMAX, KNEE	Hodnota tepelného průrazu	[°C]
C _I , CIMAX	Maximální proud kondenzátoru	[A]
C _{MAX} , C _V	Maximální napětí kondenzátoru	[V]
CPMAX	Maximální ztrátový výkon kondenzátoru	[W]
CSMAX	Závislost výkonové ztráty na teplotě	[°C/W]
CTMAX	Maximální teplota kondenzátoru	[°C]
CURRENT	Maximální zvlnění proudu	[A]
C _{VN}	Maximální závěrné napětí kondenzátoru	[V]
C _{VP}	Maximální propustné napětí kondenzátoru	[V]
DIELECTRIC, DSMAX, L _V	Dielektrická pevnost	[V]
ESR	Ekvivalentní sériový odpor	[Ω]
F, FREQ	Frekvence	[Hz]
I _B , I _{BM}	Maximální proud báze	[A]
I _C , I _{CM}	Maximální proud kolektoru	[A]
I _D	Maximální proud na drainu	[A]
I _F , I _{FAV}	Střední hodnota proudu diody v propustném směru	[A]
I _{FAVM}	Maximální střední hodnota proudu diody	[A]
I ² _{FRMS}	Kvadrát efektivní hodnoty proudu	[A ²]
I _G , I _{GM} , I _{GT}	Maximální hodnota proudu hradla tyristoru	[A]

Seznam použitých zkratk, symbolů a fyzikálních veličin

I_m	Špičková hodnota proudu diody	[A]
I_T, I_{TM}	Maximální hodnota propustného proudu tyristoru	[A]
k	Převodní konstanta transformátoru	[-]
L_1, L_2	Indukčnost vinutí transformátoru	[H]
L_I, L_{MAX}	Maximální proud cívky	[A]
MAX_TEMP	Maximální teplota	[°C]
$NEGATIVE_VOLTAGE$	Maximální záporné napětí	[V]
$P_{DM}, P_{DML}, POWER$	Maximální ztrátový výkon	[W]
PER	Doba periody	[s]
P_{FAV}	Ztrátový výkon	[W]
PSD	Výkonová spektrální hustota	[V ² /Hz]
P_{tot}	Ztrátový výkon	[W]
PW	Délka pulzu	[s]
R_{CA}, R_{9C-A}	Tepelný odpor mezi pouzdrem a prostředím	[°C/W]
r_d	Diferenciální propustný odpor	[Ω]
R_{JC}, R_{9J-C}	Tepelný odpor mezi PN přechodem a pouzdrem	[°C/W]
R_{MAX}	Maximální ztrátový výkon rezistoru	[W]
R_{SMAX}	Závislost výkonové ztráty rezistoru na teplotě	[W/°C]
R_{TH}	Tepelný odpor	[°C/W]
R_r	Hodnota odporu řídicích rezistorů	[Ω]
$RTMAX, T_B$	Maximální teplota rezistoru	[°C]
R_V, R_{VMAX}	Maximální napětí rezistoru	[V]
R_{9C-H}	Tepelný odpor mezi pouzdrem a chladičem	[°C/W]
R_{9H-A}	Tepelný odpor mezi chladičem a prostředím	[°C/W]
R_{9J-A}	Tepelný odpor mezi PN přechodem a prostředím	[°C/W]
$SLOPE$	Závislost výkonové ztráty na teplotě	[W/°C]
T_A	Teplota okolí	[°C]
TD	Zpoždění pulzu	[s]
TF	Doba sestupné hrany pulzu	[s]
T_J, T_{JL}	Maximální teplota přechodu	[°C]
TR	Doba náběžné hrany pulzu	[s]
U_1, U_2	Napětí vinutí transformátoru	[V]
U_{CBO}, V_{CB}	Maximální napětí kolektor – báze	[V]
U_{CEO}, V_{CE}	Maximální napětí kolektor – emitor	[V]
U_{EBO}, V_{EB}	Maximální napětí emitor – báze	[V]
U_{T0}	Prahové napětí na diodě	[V]
V_1, V_2	Napětíové hodnoty pulzu	[V]
V_{AMPL}	Amplitudové napětí zdroje	[mV]
V_{DG}	Maximální napětí drain – gate	[V]
V_{DS}	Maximální napětí drain – source	[V]
V_{GS}	Maximální napětí gate – source	[V]
V_{GSF}	Maximální propustné napětí gate – source	[V]
V_{GSR}	Maximální zpětné napětí gate – source	[V]
V_{INMAX}	Maximální vstupní napětí	[V]
$VOFF$	Stejnoseměrný offset	[V]
$VOLTAGE$	Maximální napětí	[V]
V_R	Maximální závěrné napětí	[V]
V_{RRM}	Maximální špičkové závěrné napětí	[V]
ΔT	Rozdíl teplot	[°C]

Obsah

Úvod	9
1. Popis vlastností a možností použití rozšířených typů analýz v prostředí OrCAD/PSpice:	10
1.1. Základní analýzy:	10
1.1.1. Bias Point (Stejnoseměrný pracovní bod)	10
1.1.2. DC Sweep (Stejnoseměrná analýza):	11
1.1.3. AC Sweep (Střídavá analýza):.....	12
1.1.4. Transient (Analýza v časové oblasti):	13
1.2. Rozšířené a doplňkové analýzy:	13
1.2.1. Noise Analysis (Lineární šumová analýza):.....	13
1.2.2. Sensitivity Analysis (Citlivostní analýza)	14
1.2.3. Fourier Analysis (Spektrální analýza)	15
1.2.4. Monte carlo / Worst case analysis (statická a toleranční analýza)	16
1.2.5. Parametric Sweep (Krokování parametru)	17
1.2.6. Temperature sweep (teplotní analýza).....	18
1.2.7. Smoke Analysis (Analýza namáhání součástek).....	19
2. Použití Smoke analýzy	21
2.1. Nastavení součástek Smoke analýzy	21
2.1.1. Rezistor.....	21
2.1.2. Kondenzátor	21
2.1.3. Elektrolýtický kondenzátor.....	22
2.1.4. Cívka.....	23
2.1.5. Dioda	23
2.1.6. Tyristor	24
2.1.7. Bipolární tranzistor	25
2.1.8. MOSFET tranzistor	25
2.2. Použití analýzy na stabilizovaném zdroji	26
2.2.1. Návrh v OrCADu a průběhy v Probe.	26
2.2.2. Smoke analýza.....	28
2.2.3. Nastavení jednotlivých součástek.....	29
2.2.4. Kondenzátory C1 – C8	29
2.2.5. Diody D1 – D4	31
2.2.6. Transformátor:	32
2.2.7. Rezistory R1 - R7	33
2.2.8. Stabilizátory U1 až U6.	34

2.2.9.	Druhé spuštění Smoke analýzy.....	35
2.3.	Použití analýzy na čtyřkvadrantovém DC/DC měniči.....	38
2.3.1.	Návrh zapojení v OrCADu a průběhy v Probe.....	38
2.3.2.	Smoke analýza.....	40
2.3.3.	Nastavení jednotlivých součástek.....	41
2.3.4.	Diody D1 – D4	41
2.3.5.	Cívka L1	42
2.3.6.	MOSFET tranzistory M1 – M4	42
2.3.7.	Rezistor R1	43
2.3.8.	Rezistory R2 – R5	44
2.3.9.	Druhé spuštění Smoke analýzy.....	44
3.	Laboratorní úloha: Aplikování Smoke analýzy	46
	Závěr.....	47
	Seznam použité literatury:.....	48

Přílohy

- Příloha na CD-ROM obsahující bakalářskou práci, anotaci ve formátu .pdf, .docx a základní soubory programu OrCAD, které byly použity pro vznik BP.
- Laboratorní úloha: Aplikování Smoke analýzy v rozsahu šesti stran

Úvod

Úkolem této bakalářské práce bude pojednání o analýze namáhání součástek (dále jen Smoke analýza). Jedná se o doplňkovou analýzu v prostředí OrCAD/PSPice, umožňující virtuální simulaci namáhání součástek v obvodu. Zkoumá a porovnává maximální naměřené hodnoty s maximálními hodnotami uvedenými u každé součástky v obvodu. Porovnává maximální hodnoty ztrátových výkonů, napětí a proudů. Důležitá je i hodnota teploty přechodu. Se znalostí těchto údajů lze vypočítat a navrhnout chlazení součástek, které se projeví změnou tepelného odporu R_{CA} .

První část této práce pojednává o všech dostupných analýzách v prostředí OrCAD/PSPice, o jejich vzájemné návaznosti a funkci. Pochopení funkcí a propojení jednotlivých analýz umožňuje lépe porozumět Smoke analýze – jejímu zařazení a použití vzhledem k ostatním analýzám.

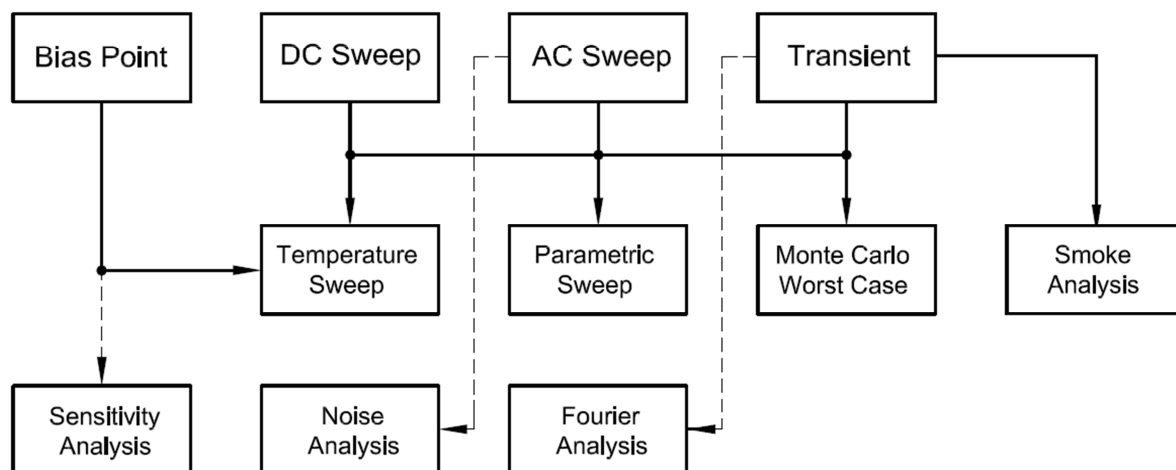
Ve druhé části je pojednáváno o správném nastavení hlavních součástek v obvodu, které jsou analýzou zkoumány. V další části je uvedena již samotná aplikace Smoke analýzy na dvou jednoduchých obvodech, složených z aktivních i pasivních elektronických součástek. Jedná se o praktického průvodce nastavením výkonových parametrů součástek v obvodu. Výsledkem tohoto nastavení je odladěný výstup Smoke analýzy, kde součástky již nejsou výkonově namáhány přes jejich povolenou mez.

Třetí část práce tvoří laboratorní úloha, která je přímým praktickým příkladem řešení problematiky Smoke analýzy na jednoduchém zapojení. Jedná se o vzorový příklad s řešením.

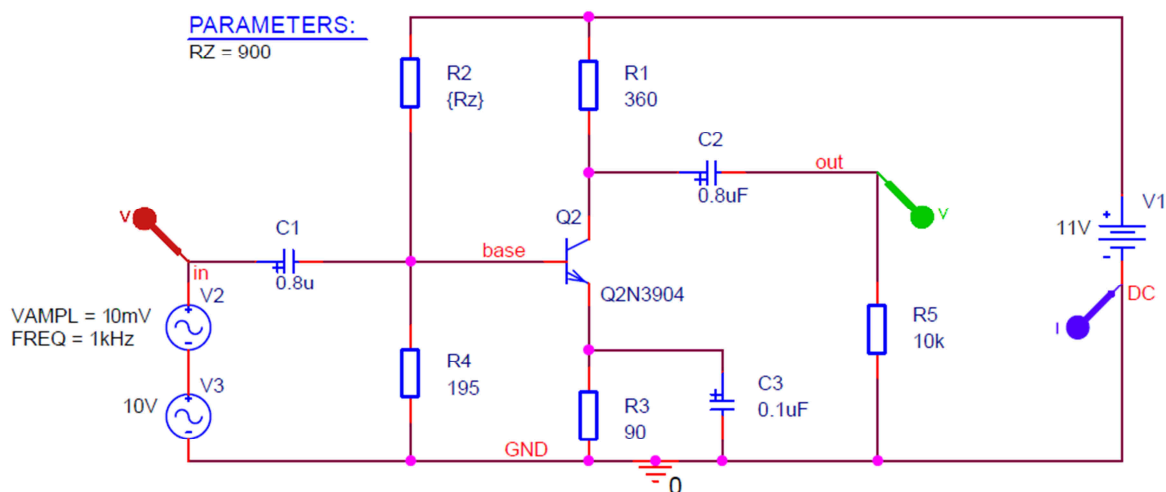
Konečným výsledkem této bakalářské práce je vědomostní přínos, který pomůže všem zájemcům o tuto problematiku se lépe orientovat v oblasti OrCAD/PSPice, konkrétně ve Smoke analýze a návrhu výkonnostních parametrů součástek.

1. Popis vlastností a možností použití rozšířených typů analýz v prostředí OrCAD/PSpice

V prostředí OrCAD/PSpice, se nacházejí čtyři hlavní analýzy, ke kterým jsou přiřazeny doplňkové a podružené analýzy (obr. 1). Jedná se celkem o jedenáct analýz, které jsou demonstrovány na jednoduchém schématu zesilovače (obr. 2).



Obr. 1: Návaznost a propojení analýz



Obr. 2: Vzorové schéma zesilovače použité jako příklad u všech použitých analýz

1.1. Základní analýzy

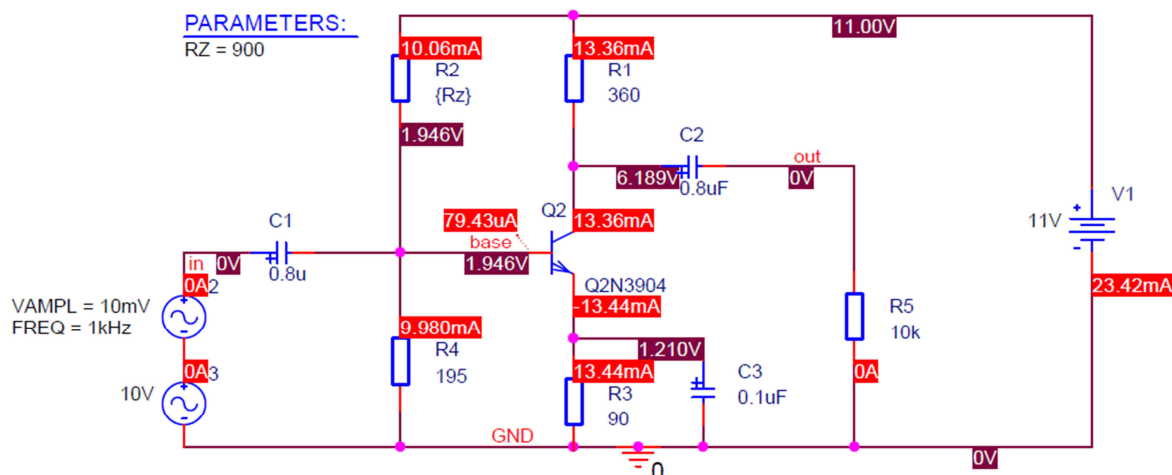
1.1.1. Bias Point (Stejnoseměrný pracovní bod)

Je to analýza, jejímž úkolem je výpočet stejnosměrného pracovního bodu. Tato analýza se používá převážně tehdy, pokud je cílem zjistit pouze všechny hodnoty napětí, proudů a výkonů, které jsou v obvodu. Výsledky analýzy se ukládají do výstupního textového souboru. Dále umožňuje provádění několik dalších funkcí a doplňkové analýzy: [1]

- Detailní výpis všech malosignálových parametrů nelineárních prvků do textového adresáře.

1. Popis vlastností a možností použití rozšířených typů analýz v prostředí OrCAD/PSpice

- Sensitivity analysis (Citlivostní analýza), která je doplněna ve výpočtech pracovního bodu.
- Small signal DC gain - výpočet stejnosměrného přenosu, vstupního a výstupního odporu v obvodu linearizovaném v pracovním bodu.
- Temperature sweep – teplotní analýzu.

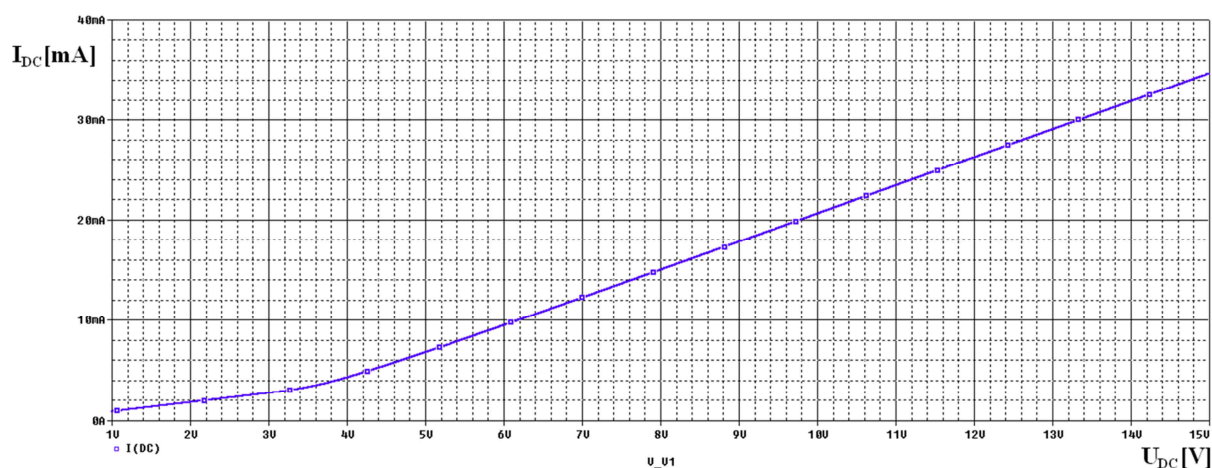


Obr. 3: Výstup analýzy Bias Point

Na obr. 3 jsou zobrazeny výstupní parametry pro tuto analýzu. V celém obvodu jsou vypsané charakteristické hodnoty napětí, proudů (možnost vyobrazit i výkony, ale kvůli přehlednosti zde zobrazené nejsou), které jsou barevně rozlišeny a přidány k jednotlivým prvkům v obvodu.

1.1.2. DC Sweep (Stejnoseměrná analýza)

Analýza pracovního bodu v obvodu, která je v závislosti na rozmítaném parametru. Analýza se používá v případech, pokud je zapotřebí provádět hlubší průzkum stejnosměrných obvodů. Stejnoseměrná analýza v obvodu ignoruje setrvačné prvky. Indukční součástky se nahrazují zkratem, kdežto s kondenzátory se vůbec nepočítá. Jsou použity všechny zdroje, které mají nastavený DC parametr. Pokud chybí a zdroj obsahuje pouze definici časového průběhu, je stejnosměrná složka od něho odvozena. Tato analýza umožňuje používat další doplňkové analýzy: Monte Carlo/Worst Case, Parametric Sweep a Temperature Sweep, o kterých je pojednáno níže. Do datového souboru se ukládají výsledky analýzy pro zobrazení v Probe. [1]



Obr. 4: Výstup analýzy DC Sweep

Průběh	Osa x	Osa y	Popis
I (DC)	U_{DC} [V]	I_{DC} [mA]	Průběh proudu jako funkce napětí V_1

Tab. 1: Popis průběhů charakteristiky k obr. 4

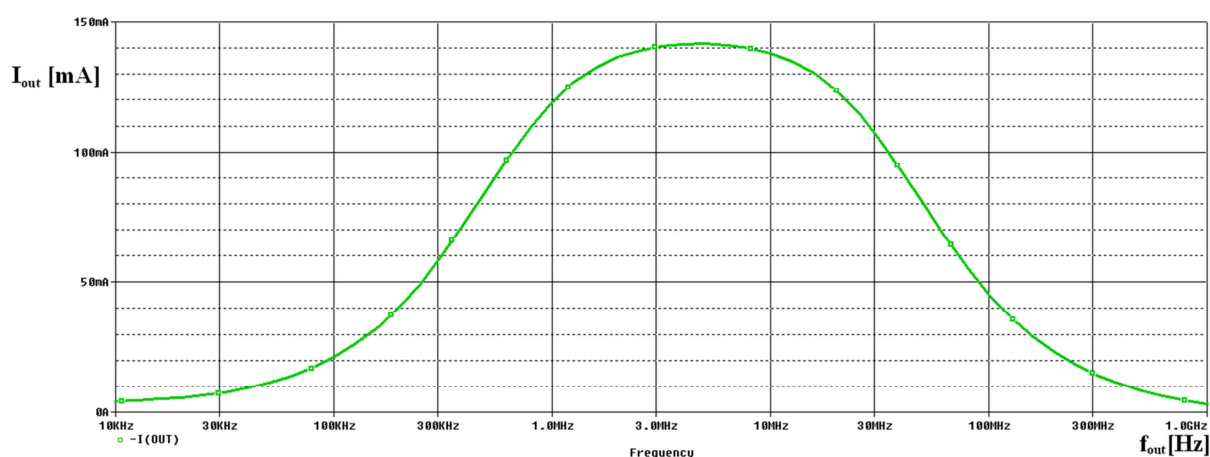
Výstupem analýzy je průběh v Probe (obr. 4), pro schéma zapojení na obr. 2, s popisem průběhu v tab. 1, který je závislostí dvou veličin. V našem případě proudu na napětí. Měření je prováděno na stejnosměrném zdroji, který je určen pro napájení našeho obvodu. Při rozsahu napětí od 1 do 15 V je patrný napřed malý a poté strmější nárůst proudu od 1 mA až do 35 mA při 15 V. Při tvorbě VA charakteristik se dá analýza dobře kombinovat s analýzou Parametric Sweep.

1.1.3. AC Sweep (Střídavá analýza)

Analýza počítá ustálenou odezvu na malý harmonický signál obvodu linearizovaného v pracovním bodě. Rozmítanou veličinou je zde frekvence, což znamená, že tato analýza je používána tam, kde je zapotřebí vidět odezvu obvodu na změnu frekvenčního pásma. Výsledky se zobrazují v Probe. Analýza je prováděna ve třech krocích:

- Výpočet stejnosměrného pracovního bodu. Tento krok funguje jako DC Sweep – při výpočtech je uplatňována stejnosměrná složka všech nezávislých zdrojů.
- Linearizace obvodu v pracovním bodu. Dále je uvažován již lineární model.
- Na harmonický signál je vypočítána odezva pomocí operátorového počtu.

Napětí a proudy v obvodu jsou komplexní veličiny. Při výpočtu odezvy podle bodu 3 jsou uplatňovány AC složky všech nezávislých zdrojů. Tato analýza rovněž nabízí doplňkové analýzy typu: Monte Carlo/Worst Case, Parametric Sweep a Temperature Sweep. [1]



Obr. 5: Výstup analýzy AC Sweep

Průběh	Osa x	Osa y	Popis
I(OUT)	f_{out} [Hz]	I_{out} [mA]	Proudová závislost na měnící se frekvenci.

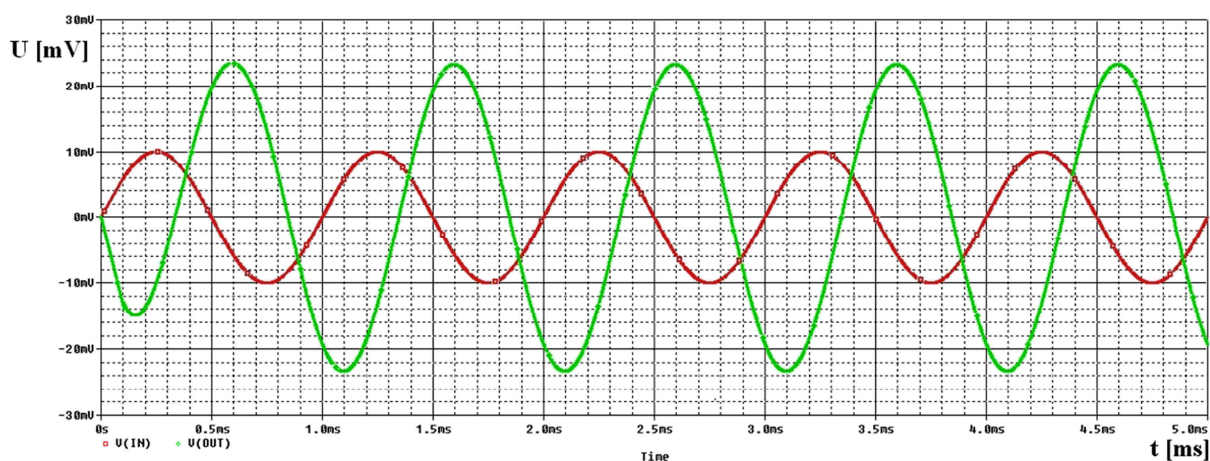
Tab. 2: Popis průběhů charakteristiky k obr. 5

Výstup analýzy AC sweep je zobrazen v Probe (obr. 5) s popisem průběhu v tab. 2. Průběh je měřen podle obvodu na obr. 2. Charakteristika je vždy závislá na jednom určitém parametru a frekvenci, protože účelem této analýzy je pozorovat změnu jedné veličiny podle změny frekvenčního pásma. Na ose x je znázorněna změna frekvenčního pásma od 100 kHz do 1 GHz a na ose y je proud

v mA. Pro výběr sledované veličiny je nabízeno více možností: od proudu a napětí, až po změnu teploty při použití doplňkové analýzy Temperature Sweep.

1.1.4. Transient (Analýza v časové oblasti)

V OrCADu je označena jako Time Domain. Tato analýza obvodu je prováděna v časové oblasti, je používána v případě, kdy je zapotřebí zjistit odezvu obvodu v závislosti na čase. Výstup je zobrazován rovněž v Probe. Pro výpočet jsou uplatňovány časové specifikace zdrojů, které mají přednost před nastavením DC parametrů. Pokud časová specifikace chybí (např. u stejnosměrného zdroje – VDC), tak se uvažuje parametr DC. Bere se na zřetel, že parametr DC u zdrojů není nikdy stejnosměrnou složkou časového průběhu. I tato analýza nabízí stejné doplňkové analýzy, jako analýzy předešlé. Jedná se o jediný typ analýzy, pod kterým jde spustit Smoke analýza. [1]



Obr. 6: Výstup analýzy Transient

Průběh	Osa x	Osa y	Popis
V(IN)	t [ms]	U_{IN} [mV]	Periodické napětí na vstupu
V(OUT)	t [ms]	U_{OUT} [mV]	Zesílené periodické napětí na výstupu

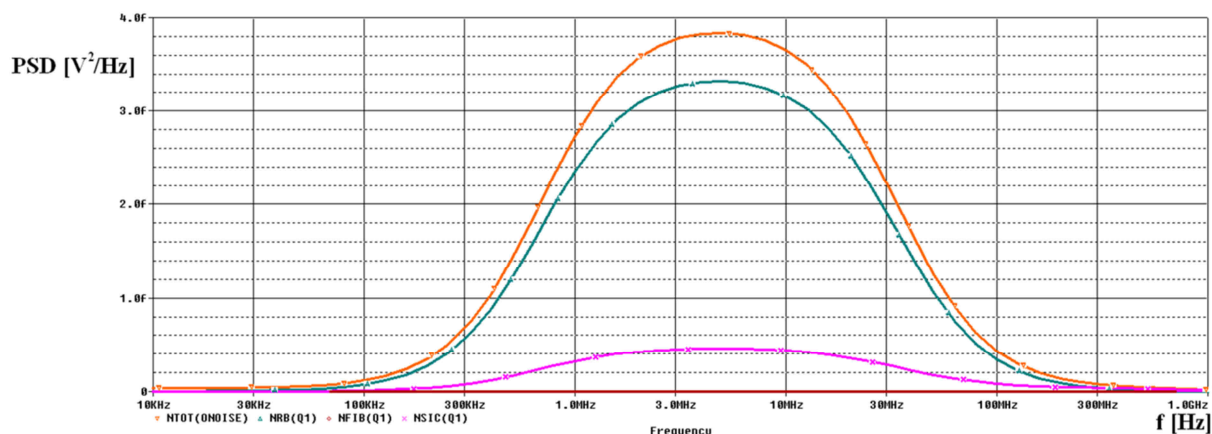
Tab. 3: Popis průběhů charakteristiky k obr. 6

Výstup analýzy v Probe je charakteristika sledující změny dané veličiny v závislosti na čase - obr. 6 s popisem průběhů v tab. 3. Výstup analýzy je měřen podle obvodu na obr. 2. V konkrétním případě se porovnává signál na vstupu (červený) a signál na výstupu (zelený). Signál na výstupu zesilovače má větší amplitudu – je zesílený. Tato analýza také umožňuje tvorbu časově závislých charakteristik pro různé sledovací veličiny.

1.2. Rozšířené a doplňkové analýzy

1.2.1. Noise Analysis (Lineární šumová analýza)

V návaznosti na střídavou analýzu je prováděna šumová analýza obvodu. Za zdroje šumu na výstupu obvodu ve frekvenční oblasti se považují příspěvky jednotlivých součástek (rezistory a polovodiče). U vstupního signálu se předpokládá, že je bez šumu. Šum je náhodnou veličinou, proto nemá smysl vyjadřovat její časový průběh, pro její popis se používá spektrální charakteristiky. Pokud se v obvodu vyskytuje více zdrojů šumu, je předpokladem, že jsou nekorelované. Jejich výkony se sčítají na výstupu, tj. kvadráty napětí. Neplatí zde princip superpozice. Důvodem provádění souběžně s AC analýzou je potřeba znát malosignálovou přenosovou funkci od zdroje šumu, aby bylo možné přepočíst jednotlivé šumové příspěvky na výstupu. Výstup je vyobrazen v Probe. [1]



Obr. 7: Výstup šumové analýzy

Průběh	Osa x	Osa y	Popis
NTOT(ONoise)	f [Hz]	PSD [V²/Hz]	Celkový šum tranzistoru Q1
NRB (Q1)	f [Hz]	PSD [V²/Hz]	Tepelný šum (thermal noise) tranzistoru Q1
NFIB (Q1)	f [Hz]	PSD [V²/Hz]	Kmitající šum (flicker noise) tranzistoru Q1
NSIC (Q1)	f [Hz]	PSD [V²/Hz]	Fotonový šum (shot noise) tranzistoru Q1

Tab. 4: Popis průběhů charakteristiky k obr. 7

Výstup analýzy v Probe je šumová charakteristika, která vyobrazuje úroveň šumu při průběhu frekvenci. Její výstup je zobrazen na obr. 7 s popisem průběhů v tab. 4. Šumová analýza je měřena pro tranzistor v obvodu na obr. 2. Průběh šumové analýzy je v našem případě velmi podobný s AC analýzou – frekvenční pokrytí je téměř totožné. Pro příklad jsou zde uvedeny tři různé průběhy šumu a jejich celkový průběh. Modrý průběh označuje tepelný (Johnsonův) šum, který je způsoben nahodilým pohybem elektronů v krystalové mřížce polovodiče a je závislý pouze na teplotě, nezávislý na frekvenci, napětí ani proudu. Růžový průběh značí kmitající šum, někdy také označován jako šum růžový, je to signál, nebo proces s takovým frekvenčním rozsahem, že výkonová frekvenční hustota je přímo úměrná převrácené hodnotě frekvence. Červený průběh udává fotonový šum, který vyplývá ze stochastického charakteru pohybu fotonů. Emise a odrazy fotonů jsou seřazené, ale mají velmi složité deterministické chování v prostoru a čase, že se ve výsledku rovná nahodilému výskytu, tudíž i při dokonale homogenním přirozeném světle dopadne na stejné plošky vedle sebe různý počet fotonů. V našem případě tento typ šumu nemá na obvod vliv, proto jsou hodnoty šumu nulové. Hodnota na ose y, je takzvaná výkonová spektrální hustota (PSD)[3]

1.2.2. Sensitivity Analysis (Citlivostní analýza)

Analýza provádí výpočet citlivosti stejnosměrného pracovního bodu (viz Bias Point) na parametry rezistorů, proudových a napěťových zdrojů, spínačů a vypínačů, diod a bipolárních tranzistorů. V nastavovacím okně se specifikuje seznam sledovaných veličin, které oddělujeme mezerou. Proud se může specifikovat pouze přes napěťový zdroj. Výsledky se ukládají do výstupního textového souboru typu *.out. V souboru se nalézají výsledky, které jsou uspořádány do čtyř různých sloupců. První sloupec udává jméno parametru, druhý jeho hodnotu, třetí jeho absolutní citlivost a poslední jeho semirelativní citlivost v procentech. [1]

Výpis citlivostní analýzy:
DC SENSITIVITIES OF OUTPUT V(BASE)

<i>ELEMENT NAME</i>	<i>ELEMENT VALUE</i>	<i>ELEMENT SENSITIVITY (VOLTS/UNIT)</i>	<i>NORMALIZED SENSITIVITY (VOLTS/PERCENT)</i>
<i>R_R1</i>	<i>3.600E+02</i>	<i>-2.140E-06</i>	<i>-7.704E-06</i>
<i>R_R2</i>	<i>9.000E+02</i>	<i>-1.771E-03</i>	<i>-1.594E-02</i>
<i>R_R3</i>	<i>9.000E+01</i>	<i>1.487E-04</i>	<i>1.338E-04</i>
<i>R_R4</i>	<i>1.950E+02</i>	<i>8.111E-03</i>	<i>1.582E-02</i>
<i>R_R5</i>	<i>1.000E+04</i>	<i>0.000E+00</i>	<i>0.000E+00</i>
<i>V_V1</i>	<i>1.100E+01</i>	<i>1.762E-01</i>	<i>1.939E-02</i>
<i>V_V2</i>	<i>0.000E+00</i>	<i>0.000E+00</i>	<i>0.000E+00</i>
<i>V_V3</i>	<i>0.000E+00</i>	<i>0.000E+00</i>	<i>0.000E+00</i>
<i>RB</i>	<i>1.000E+01</i>	<i>8.914E-07</i>	<i>8.914E-08</i>
<i>RC</i>	<i>1.000E+00</i>	<i>-2.140E-06</i>	<i>-2.140E-08</i>
<i>RE</i>	<i>0.000E+00</i>	<i>0.000E+00</i>	<i>0.000E+00</i>
<i>BF</i>	<i>4.164E+02</i>	<i>1.365E-05</i>	<i>5.682E-05</i>
<i>ISE</i>	<i>6.734E-15</i>	<i>-1.012E+12</i>	<i>-6.818E-05</i>
<i>BR</i>	<i>7.371E-01</i>	<i>-1.962E-12</i>	<i>-1.446E-14</i>
<i>ISC</i>	<i>0.000E+00</i>	<i>0.000E+00</i>	<i>0.000E+00</i>
<i>IS</i>	<i>6.734E-15</i>	<i>7.617E+11</i>	<i>5.129E-05</i>
<i>NE</i>	<i>1.259E+00</i>	<i>1.223E-01</i>	<i>1.540E-03</i>
<i>NC</i>	<i>2.000E+00</i>	<i>0.000E+00</i>	<i>0.000E+00</i>
<i>IKF</i>	<i>6.678E-02</i>	<i>2.577E-02</i>	<i>1.721E-05</i>
<i>IKR</i>	<i>0.000E+00</i>	<i>0.000E+00</i>	<i>0.000E+00</i>
<i>VAF</i>	<i>7.403E+01</i>	<i>-9.150E-06</i>	<i>-6.774E-06</i>
<i>VAR</i>	<i>0.000E+00</i>	<i>0.000E+00</i>	<i>0.000E+00</i>

JOB CONCLUDED

Výstup analýzy je v textovém souboru typu *.out. Zde je patrné ono rozdělení do čtyř sloupců, které jsou popsány v předchozím odstavci. Citlivostní analýza byla prováděna na obvodu zobrazeném na obr. 2.

1.2.3. Fourier Analysis (Spektrální analýza)

Fourierova analýza je provedena na průběhu získaném časovou simulací, to znamená, že samostatně nemá smysl. Dialog pro nastavení je otevírán tlačítkem Output File Options v okně pro časovou analýzu. Pro nastavení musíme zadat frekvenci první harmonické, tj. periodu T. Před transformací je navzorkován poslední úsek délky T v časovém průběhu. Nastavením Print Step je určen vzorkovací interval, nikdy však nepřekročí 1% z délky simulačního intervalu. Pro správnou funkci je nutné, aby čas celkové simulace byl delší než jedna perioda. Fourierova analýza má smysl pouze tehdy, pokud je navzorkována jedna perioda signálu v ustáleném stavu.[1]

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(OUT)

DC COMPONENT = -1.638689E-06

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	1.000E+03	3.277E-06	1.000E+00	-9.021E+01	0.000E+00
2	2.000E+03	3.277E-06	1.000E+00	-9.042E+01	9.000E+01
3	3.000E+03	3.277E-06	1.000E+00	-9.063E+01	1.800E+02
4	4.000E+03	3.277E-06	1.000E+00	-9.084E+01	2.700E+02
5	5.000E+03	3.277E-06	1.000E+00	-9.105E+01	3.600E+02
6	6.000E+03	3.277E-06	1.000E+00	-9.126E+01	4.500E+02
7	7.000E+03	3.277E-06	9.999E-01	-9.147E+01	5.400E+02
8	8.000E+03	3.277E-06	9.999E-01	-9.168E+01	6.300E+02
9	9.000E+03	3.277E-06	9.999E-01	-9.189E+01	7.200E+02

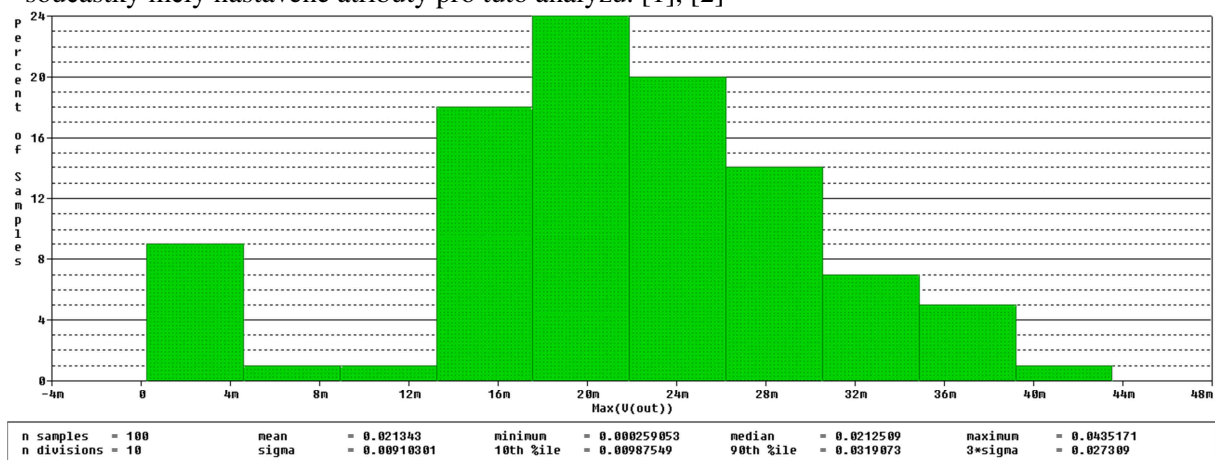
TOTAL HARMONIC DISTORTION = 2.828308E+02 PERCENT

JOB CONCLUDED

Výstup analýzy je textový soubor, kde jsou vypsané informace na základě harmonické hodnoty, ke které je přiřazena její frekvence, spektrální přírůstek, normalizovaný přírůstek, fáze a normalizovaná fáze. Analýza byla prováděna na obvodu, který je vyobrazen na obr. 2.

1.2.4. Monte carlo / Worst case analysis (statická a toleranční analýza)

Jedná se o doplňkovou analýzu, na kterou již bylo odkazováno výše. Parametry součástek, z nichž jsou sestaveny reálné obvody, vždy vykazují jistý rozptyl kolem nominální hodnoty. Během analýzy Monte Carlo jsou parametry vybírány náhodně z tolerančního intervalu. Pro každý výběr se stanoví hledaná funkce obvodu. Při dostatečném počtu výběru jsme schopni odhadnout v jakém intervalu bude ležet sledovaná funkce. V obvodu provede analýzu fungování obvodu v závislosti na náhodně vybraných hodnot součástek z jejich tolerančního pásma. Analýza umožňuje i pokročilou analýzu (The Advanced Analysis Monte Carlo tool) Při analýze se musí brát na zřetel, aby vybrané součástky měly nastavené atributy pro tuto analýzu. [1], [2]



Obr. 8: Výstup analýzy Monte carlo

1. Popis vlastností a možností použití rozšířených typů analýz v prostředí OrCAD/PSpice

Průběh	Osa x	Osa y	Popis
Monte-Carlo	U [mV]	percent. [%]	Procentuální rozkmit hodnot napětí na výstupu

Tab. 5: Popis průběhů charakteristiky k obr. 8

Výstupem této analýzy je graf v prostředí Probe (obr. 8) s popisem hodnot v tab. 5. Graf procentuálně vyjadřuje změnu hodnot z důsledku tolerance hodnot použitých součástek, procentuální rozptyl se liší s velikostí napětí na výstupu. V tomto případě je zvolena tolerance součástek na větší hodnotou 20%, aby byl velmi dobře patrný rozptyl hodnot.

Analýza Worst Case hledá takové rozložení hodnot parametrů součástek v rámci tolerančních intervalů, které znamenají nejhorší možnou hodnotu sledované veličiny. Je vhodná v těch simulacích, kdy by maximální, nebo minimální hodnota součástky přivodila nežádoucí vliv v zapojeném obvodu. Zde se rovněž musí brát zřetel, že tato analýza je možná jen u těch součástek, které mají definované správné atributy. [1]

WORST CASE SUMMARY

Mean Deviation = .0116

Sigma = 0

RUN MAX DEVIATION FROM NOMINAL

WORST CASE ALL DEVICES

.0116 higher at T = 638.3300E-06

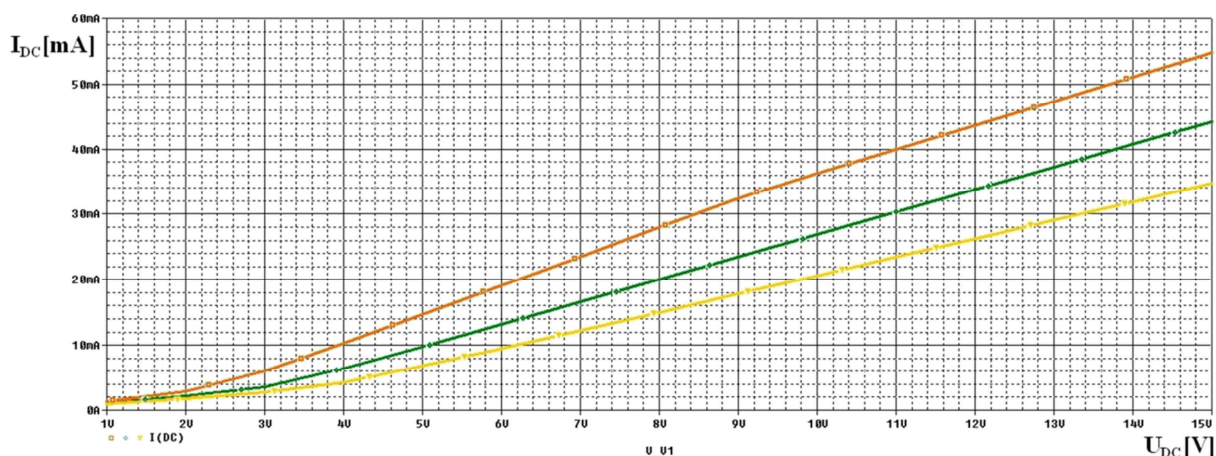
(149.3 % of Nominal)

JOB CONCLUDED

Výstup Worst Case je dán textovým popisem v souboru *.out. Výstup popisuje nejvyšší možné odchylky od nominálních hodnot, které jsou způsobené zvolenou tolerancí součástek. V demonstrovaném případě se použily stejné parametry jako v analýze Monte Carlo. Obě analýzy byly použity pro stejný obvod, který je vyobrazen na obr. 2.

1.2.5. Parametric Sweep (Krokování parametru)

Další doplňková analýza. Analýza slouží jako vnější smyčka k AC, DC nebo Transient. Tato doplňková analýza se používá v těch případech, kdy je zapotřebí krokově v obvodu měnit hodnoty určitého parametru, např. při tvorbě VA charakteristik. Nastavená veličina se krokuje jako parametr některé ze základních analýz. Pro plánovanou změnu hodnot určité součástky se používá funkce *param*, kterou použijeme v zapojeném obvodu. [1]



Obr. 9: Výstup analýzy Parametric Sweep

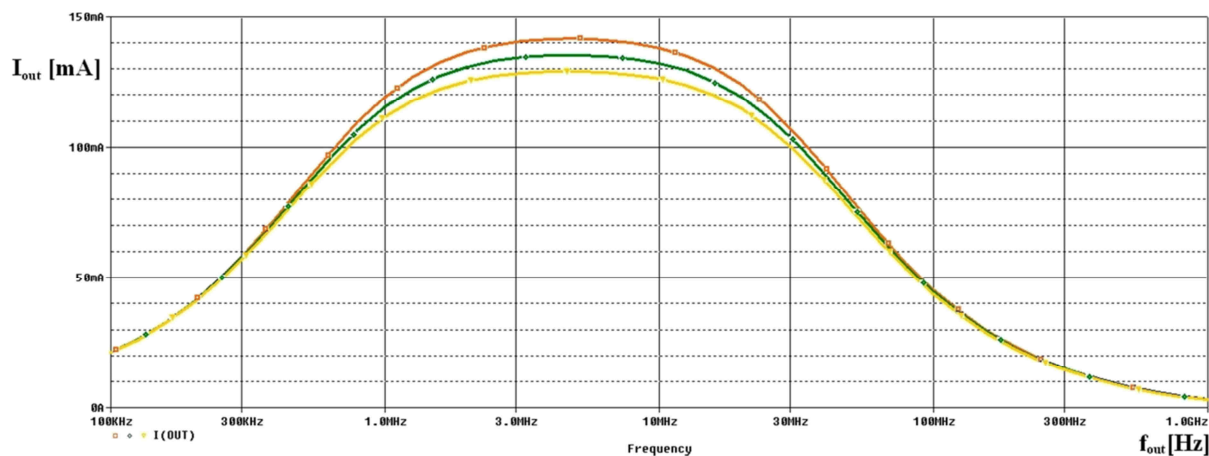
Průběh	Hodnota R_z [Ω]	Popis
I(DC)	500	Měření ss proudu při změně hodnoty R_z
I(DC)	700	Měření ss proudu při změně hodnoty R_z
I(DC)	900	Měření ss proudu při změně hodnoty R_z

Tab. 6: Popis průběhů charakteristiky k obr. 9

Výstupem krokování parametru je graf v Probe. (obr. 9), popsány průběhy v tab. 6. V tomto případě je prováděna změna odporu R_z a charakteristika udává průběhy těchto změn. Tímto rozšířením se může sledovat několik různých průběhů v jednom okně, vhodné pro detailnější VA charakteristiky. Analýza byla použita pro obvod z obr. 2.

1.2.6. Temperature sweep (teplotní analýza)

Globální proměnná TNOM určuje teplotu obvodu. Nastavuje se v záložce Options simulačního profilu. Rozmítání teploty je možné použít v analýze DC Sweep a vícenásobné Parametric Sweep. Také existuje speciální položka Temperature, kde se může přímo nastavit rozptyl teplot, oddělených mezerou, jsou to hodnoty teplot, pro které bude analýza zhotovena. Teplotní závislost je obvykle obsažena v modelech polovodičů. Pro ostatní prvky musí uživatel specifikovat teplotní koeficient sám prostřednictvím modelu. K tomuto účelu existuje knihovna značek breakout, která obsahuje součástky s prázdnými modely. Součástky jsou určené k uživatelské úpravě. V modelech je možné specifikovat teplotní koeficienty, jejich jména a význam je uveden v popisu každého modelu v referenční příručce. [1]



Obr. 10: Výstup teplotní analýzy

Průběh	Teplota [°C]	Popis
I(OUT)	27	Měření frekvenční charakteristiky při změně teploty
I(OUT)	50	Měření frekvenční charakteristiky při změně teploty
I(OUT)	75	Měření frekvenční charakteristiky při změně teploty

Tab. 7: Popis průběhů charakteristiky na obr. 10

Výstup teplotní analýzy (obr. 10), s průběhy v tab. 7, je velmi podobný výstupu analýzy Parametric Sweep, s tím rozdílem, že zde se zobrazují různé průběhy, podle zvolených hodnot. U teplotní analýzy jsou zobrazeny různé průběhy, které jsou dány změnou teploty. V tomto případě lze pozorovat změnu hodnoty proudu ve VA charakteristice tranzistoru. Analýza byla provedena na stejném obvodu, který je zobrazen na obr. 2.

1.2.7. Smoke Analysis (Analýza namáhání součástek)

Smoke analýza varuje před namáháním součástek kvůli výkonovým ztrátám, zvýšením teploty na PN přechodu, sekundární průrazy, napěťové špičky a proudové limity. Tato namáhání mohou v průběhu času způsobit selhání správného fungování obvodu. Analýza využívá Maximální provozní podmínky (Maximum Operating Conditions – MOCs), které jsou dodávány prodejci a odlehčujícími faktory dodávané návrháři pro výpočet Bezpečnostních provozních limitů (Safe Operating Limits – SOLs) parametrů součástek. Analýza porovnává výsledky simulace obvodu s bezpečnými provozními limity součástek. Pokud se v simulaci obvodu zjistí, že se překračují povolené limity, analýza identifikuje problémové parametry. Použije „Smoke“ pro zobrazení střední hodnoty, efektivní hodnoty, a nebo špičkové hodnoty od výsledků simulace a porovná tyto hodnoty k bezpečným provozním limitům. Analýza je závislá na analýze Transient, proto nastavení časové analýzy přímo ovlivňuje průběhy Smoke analýzy. [2]; [3]

Výstup Smoke analýzy je dán tabulkou (tab. 9), pro schéma na obr. 2. Tabulka obsahuje naměřené hodnoty a hodnoty maximální. Pro úplnou přehlednost je odchylka mezi naměřenou a maximální hodnotou vyobrazena grafem a seřazena od nejmenší odchylky mezi maximální a naměřenou hodnotou (v grafu procentuálně jako nejvyšší hodnota, která překračuje maximum). Pro přehlednost byla převedena tabulka z prostředí analýzy do prostředí MS Excel.

Popis tabulky:

- barva vlajky: Zelená vlajka udává, že pro zvolený typ měření (RMS, Peak a Average) jsou maximální hodnoty u součástky definovány. Pokud nejsou správně definovány, vlajka má barvu žlutou, znamená to, že pro tento parametr buď chybí určitý Smoke parametr, nebo pro tento parametr není součástka definována (šedý průběh)
- Component: Název součástky, na které je měření prováděné.
- Parameter: Parametr součástky, který je měřený v analýze
- Type: typ měření – RMS (efektivní hodnota), Average (střední hodnota), Peak (maximální hodnota).
- Rated Value: ukazuje maximální přípustnou hodnotu parametru součástky, která je zadána v PSpice modelu součástky.
- % Derating: jedná se o bezpečnostní odlehčení maximálního parametru součástky, pokud je hodnota 100%, je odlehčení nulové. V analýze lze nastavit, jestli chceme počítat průběhy se standardním odlehčením, nebo bez něj. Se standardním odlehčením jsou zahrnuty odlehčující faktory, které jsou zahrnuty v analýze. Existuje možnost přidat své vlastní odlehčující parametry v okně Profile Settings.
- Max Derating: skutečná přípustná maximální hodnota, kterou analýza uvažuje.
- Measured Value: měřená hodnota.

1. Popis vlastností a možností použití rozšířených typů analýz v prostředí OrCAD/PSpice

- % Max: procentuální hodnota mezi naměřenou a maximální hodnotou. Rozlišuje se podle zobrazené barvy:

0 – 90 %	91 – 100 %	101 % – < MAX >
Tento parametr není definován		

Tab. 8: Barevné rozdělení vyhodnocení analýzy

Parametry, které jsou vyznačené šedou procentuální hodnotou, nemusí být vyhodnoceny správně pro daný parametr, proto se neuvažují a při použití analýzy jsou skryta použitím Hide Invalid Values.

•	Component	Parameter	Type	Rated Value	% Derating	Max Derating	Measured Value	% Max
	Q2	VCE	Peak	4	100	4	5.0084	126
	Q2	VCE	Average	4	100	4	4.96	125
	Q2	VCE	RMS	4	100	4	4.96	125
	R2	PDM	Average	250m	50	125.1671m	91.0829m	73
	R2	PDM	Peak	250m	50	125.0438m	91.2062m	73
	R2	PDM	RMS	250m	50	125.1670m	91.0830m	73
	R2	TB	Average	200	100	200	99.8663	50
	R2	TB	Peak	200	100	200	99.9650	50
	R2	TB	RMS	200	100	200	99.8664	50
	R1	PDM	Average	250m	60	151.9652m	64.2848m	43
	R1	PDM	Peak	250m	60	151.3267m	64.9233m	43
	R1	PDM	RMS	250m	60	151.9638m	64.2862m	43
	R1	TB	Average	200	100	200	78.4279	40
	R1	TB	Peak	200	100	200	78.9386	40
	R1	TB	RMS	200	100	200	78.4290	40
	Q2	TJ	Average	150	100	150	40.3197	27
	Q2	TJ	Peak	150	100	150	40.3310	27
	Q2	TJ	RMS	150	100	150	40.3197	27
	R4	TB	Average	200	100	200	42.5364	22
	R4	TB	Peak	200	100	200	42.6385	22
	R4	TB	RMS	200	100	200	42.5366	22
	R3	TB	Average	200	100	200	40.0100	21
	R3	TB	Peak	200	100	200	40.1439	21
	R3	TB	RMS	200	100	200	40.0103	21
	R5	TB	Average	200	100	200	27.0000	14
	R5	TB	Peak	200	100	200	27.0000	14
	R5	TB	RMS	200	100	200	27.0000	14
	Q2	VCE	Average	40	100	40	4.96	13
	Q2	VCE	Peak	40	100	40	5.0084	13
	Q2	VCE	RMS	40	100	40	4.96	13
	Q2	VEB	RMS	6	100	6	736.2191m	13
	C2	CVP	Average	50	100	50	6.1888	13
	C2	CVP	Peak	50	100	50	6.1893	13
	C2	CVP	RMS	50	100	50	6.1888	13
	R4	PDM	Average	250m	78	196.8295m	19.4205m	10
	R4	PDM	Peak	250m	78	196.7019m	19.5481m	10
	R4	PDM	RMS	250m	78	196.8293m	19.4207m	10
	R3	PDM	Average	250m	79	199.9875m	16.2625m	9
	R3	PDM	Peak	250m	79	199.8201m	16.4299m	9
	R3	PDM	RMS	250m	79	199.9871m	16.2629m	9
	Q2	VCB	Average	60	100	60	4.33	8
	Q2	VCB	Peak	60	100	60	4.24	8
	Q2	VCB	RMS	60	100	60	4.34	8
	C1	CVP	RMS	50	100	50	1.60	4
	C3	CVP	Average	50	100	50	1.98	3
	C3	CVP	Peak	50	100	50	1.60	3
	C3	CVP	RMS	50	100	50	1.98	3
	C1	CI	Average	1	100	1	986.7413n	1
	C1	CI	Peak	1	100	1	39.6469u	1
	C1	CI	RMS	1	100	1	27.0436u	1
	C2	CI	Average	1	100	1	56.1197n	1
	C2	CI	Peak	1	100	1	2.3487u	1
	C2	CI	RMS	1	100	1	1.6040u	1
	C3	CI	Average	1	100	1	62.8109n	1
	C3	CI	Peak	1	100	1	3.8154u	1
	C3	CI	RMS	1	100	1	2.6794u	1
	R5	PDM	Average	250m	86	216.2500m	25.7268n	1
	R5	PDM	Peak	250m	86	216.2499m	55.1620n	1
	R5	PDM	RMS	250m	86	216.2500m	31.9806n	1
	Q2	VEB	Average	6	100	6	-736.2191m	0
	Q2	VEB	Peak	6	100	6	-736.0553m	0
	C1	CVP	Average	50	100	50	-1.9460	0
	C1	CVP	Peak	50	100	50	-1.9380	0

Tab. 9: Výstup Smoke analýzy převedený do tabulky v prostředí MS Excelu

2. Použití Smoke analýzy

Použití Smoke analýzy je popsán na následujících stranách, kde je v první části popsáno nastavení Smoke parametrů jednotlivých pasivních a několika nepoužívanějších aktivních součástek. V další části se nachází již samotná aplikace analýzy na dvou simulovaných obvodech.

2.1. Nastavení součástek Smoke analýzy

Ke správnému používání Smoke analýzy je zapotřebí mít správně definované Smoke parametry jednotlivých součástek, každá součástka má své hodnoty, které musí být pro správnou funkci analýzy zadány. Smoke parametry se zadávají u většiny součástek (kromě pasivních z knihovny ANALOG) v PSpice Model Editoru v tabulce Smoke Parameters. Pokud součástka nemá žádné parametry, musí se podle typu součástky vytvořit nové parametry cestou: Model -> Add Smoke...

2.1.1. Rezistor

Smoke parametry rezistoru najdeme v prostředí Property Editor (tab. 10) lze nastavit tyto čtyři parametry. Pokud se nezasahuje do výchozího nastavení, Smoke analýza pracuje s parametry rezistoru vyznačené v tab. 11. Tmavě šedá oblast se při výchozím nastavení neukáže v analýze, lze ji zobrazit přidáním hodnoty RVMAX v Property Editoru.

MAX_TEMP	RTMAX
POWER	RMAX
SLOPE	RSMAX
VOLTAGE	RVMAX

Tab. 10: Property Editor rezistoru

Device Max Ops	Value	Unit
T _B	200	°C
P _{DM}	250m	W
R _V		V

Tab. 11: Smoke parametry rezistoru

Každý rezistor, který vložíme do schématu, je ¼ W s maximální špičkovou teplotou (než dojde k poškození součástky) 200 °C. Tyto parametry lze nahradit vlastními v Property Editoru. Hodnota T_B se nastaví v položce MAX_TEMP a hodnota P_{DM} v položce POWER.

Ztrátový výkon rezistoru se určí ze schématu, nebo právě ze Smoke analýzy, která ukáže, zda odpor výkonově dostačuje. Určení maximální teploty záleží na typu rezistoru, u uhlíkových, metalizovaných, metal oxidových a SMD rezistorů se pohybuje akceptovatelná průměrná teplota od -55 °C do +70 °C. S teplotou nad 70°C se zhoršují ohmické vlastnosti rezistoru. Maximální teplota je okolo 155 °C, záleží na druhu. Drátové rezistory, které se používají pro větší výkony, mají větší maximální tepelné hodnoty. [4]; [5].

Maximální napětí rezistoru se volí podle ztrátového výkonu a druhu rezistoru, nachází se v katalogovém listu. Pro zjednodušení, je zvoleno maximální (provozní!) napětí podle tab. 12, která je sestavena z katalogových listů společnosti Vishay [5].

Jedná se o průměrné hodnoty, které by měly být brány s určitou rezervou.

Ztrátový výkon [W]	1/8	1/4	1/2	1	2	5	10	25	50
Maximální pracovní napětí [V]	200	250	350	350	350	750	750	750	800
Maximální špičkové napětí [V]	400	500	700	700	700	1000	1000	1000	1200

Tab. 12: Maximální napěťové hodnoty rezistorů

2.1.2. Kondenzátor

V případě kondenzátoru najdeme parametry rovněž v prostředí Property Editor (tab. 13).

CURRENT	CIMAX
KNEE	CBMAX
MAX_TEMP	CTMAX
SLOPE	CSMAX
VOLTAGE	CMAX

Tab. 13: Property Editor kondenzátoru

Device Max Ops	Value	Unit
C _V	50	V
C _I	1	A

Tab. 14: Smoke parametry kondenzátoru

Pro Smoke analýzu je u kondenzátoru důležitá maximální hodnota pracovního napětí C_V , která se nastavuje změnou hodnoty CMAX. Pokud bude hodnota nezměněna, v nastavení zůstane výchozí hodnota 50 V (tab. 14.). Tato hodnota je uvedena jako primární u každého kondenzátoru včetně hodnoty jeho kapacity. Druhou porovnávanou hodnotou je maximální provozní proud kondenzátoru, který se obvykle v katalogovém listu nenachází, ale lze tento parametr součástky zjistit právě použitím Smoke analýzy.

Ostatní parametry nejsou pro tuto analýzu příliš potřebné, jelikož je analýza nezobrazuje.

2.1.3. Elektrolytický kondenzátor

CURRENT	CIMAX
ESR	ESR
KNEE	CBMAX
MAX_TEMP	CTMAX
NEGATIVE_VOLTAGE	CVN
POWER	CPMAX
RTH	THERMR
SLOPE	CSMAX
Voltage	CMAX

Tab. 15: Property editor elektrolytického kondenzátoru

Device Max Ops	Value	Unit
C_{VP}	50	V
C_{VN}		V
C_I	1	A
P_{DML}		W
T_{JL}	125	°C

Tab. 16: Smoke parametry elektrolytického kondenzátoru

Oproti obyčejnému kondenzátoru jsou zde navíc tři další hodnoty (tab. 16). Hodnota C_{VP} odpovídá hodnotě C_V . První hodnotou, která zde přibyla je C_{VN} – maximální zpětné napětí na elektrolytickém kondenzátoru. Analýza tohoto parametru nefunguje správně, protože měří i kladné napětí procházející kondenzátorem, proto nebude uvažována. Druhou hodnotou je maximální ztrátový výkon kondenzátoru P_{DML} , který lze určit výpočtem:

$$P_{DML} = ESR \cdot I_{RMS}^2 \quad (1)$$

Krom výpočtu se musí hodnota ekvivalentního sériového odporu ESR vložit i do Property editoru (tab. 15), aby analýza ztrátového výkonu fungovala správně. Hodnotu ESR se určí podle následující tab. 17:

Napětí Kapacita	10 V	16 V	25 V	35 V	63 V	160 V	250 V
1 μF			5	4	6	10	20
2,2 μF			2,5	3	4	9	14
4,7 μF	>40	35	6	3	2	6	5
10 μF	20	1,6	1,5	1,7	2	3	6
22 μF	3	0,8	2	1	0,8	1,6	3
47 μF	1	2	1	1	0,6	1	2
100 μF	0,6	0,9	0,5	0,5	0,3	0,5	1
220 μF	0,3	0,4	0,4	0,2	0,15	0,25	0,5
470 μF	0,15	0,2	0,25	0,1	0,1	0,2	0,3
1000 μF	0,1	0,1	0,1	0,04	0,04	0,15	0,15
4700 μF	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,1
10000 μF	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,1	0,1

Tab. 17: Volba odporu ESR pro elektrolytický aluminiový kondenzátor [6]

Třetí hodnotou je maximální tepelná hodnota pouzdra kondenzátoru, která se u elektrolytických kondenzátorů pohybuje v rozmezí od 85 °C do 150 °C [5]. V Property editoru je nastavená výchozí hodnota 125 °C (tab. 16). Pro správnou funkci analýzy teploty je důležité zadat do Property editoru tepelný odpor kondenzátoru R_{TH} , který se určí z následující tab. 18:

Rozměr [mm]	22x25	22x30	22x35	22x40	22x50	25x25	25x30	25x35	25x40
R_{TH} [°C/W]	30,38	28,15	26,48	25,20	23,39	25,10	23,33	22,00	20,99
Rozměr [mm]	25x45	25x50	30x25	30x30	30x35	30x40	30x45	30x50	35x25
R_{TH} [°C/W]	20,19	19,58	19,12	17,86	16,91	16,18	15,62	15,19	15,18
Rozměr [mm]	35x30	35x35	35x40	35x45	35x50	35x63	35x80	35x105	40x40
R_{TH} [°C/W]	14,24	13,53	13,00	12,58	12,26	11,72	11,39	11,21	1074
Rozměr [mm]	40x50	40x63	40x80	40x108	50x50	50x63	50x80	80x92	50x105
R_{TH} [°C/W]	10,18	9,79	9,57	9,51	7,45	7,23	7,14	7,14	7,15

Tab. 18: Volba tepelného odporu R_{TH} pro elektrolytické kondenzátory [7]

2.1.4. Cívka

Tato pasivní součástka má nastavení Smoke parametrů v Property Editoru (tab. 19).

CURRENT	LMAX
DIELECTRIC	DSMAX

Tab. 19: Property editor cívky

Device Max Ops	Value	Unit
L_V	300	V
L_I	5	A

Tab. 20: Smoke parametry cívky

U cívky jsou k nastavení pouze dvě hodnoty, maximální pracovní proud procházející cívkou a maximální dielektrická pevnost cívky. Hlavní sledovanou hodnotou je maximální proud procházející cívkou (tab. 20). Tato hodnota se nachází u každé cívky v jejím katalogovém listě. Hodnota maximálního dielektrického napětí lze zjistit právě za pomoci Smoke analýzy.

2.1.5. Dioda

Některé součástky nemají definované Smoke parametry, proto je možnost dle katalogového listu součástky každé diodě přidat Smoke parametry. Pro správné zvolení parametrů je důležité znát průběhy procházející diodou. V tomto případě lze předpokládat, že diodou prochází sinusová půlvlna. Příklad je uveden pro diodu 1N4007. Zjištěné údaje se zapisují do PSpice model editoru (tab. 21).

Katalogové hodnoty [8]:

$I_{FAV} = 1 \text{ A}$
 $V_{RRM} = 1000 \text{ V}$
 $T_J = -50 \text{ až } +150 \text{ °C}$
 $T_A = 25 \text{ °C}$
 $R_{\theta J-A} = 50 \text{ °C/W}$
 $R_{\theta J-C} = 25 \text{ °C/W}$

Device Max Ops	Value	Unit
I_F	1	A
V_R	1000	V
P_{DM}	2,23	W
T_J	150	°C
R_{JC}	25	°C/W
R_{CA}	25	°C/W

Tab. 21: Smoke parametry diody

Pro výpočet ztrátového výkonu musíme vypočítat kvadrát efektivní hodnoty diody, když:

$$I_m = I_{FAV} \cdot 2\pi = 1 \cdot 2\pi = 6,283 \text{ A} \quad (2)$$

$$I_{FRMS}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i_F^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (I_m \cdot \sin i_F)^2 \cdot (\omega t) d\omega t = 9,869 A^2 \quad (3)$$

Celkový ztrátový výkon je roven:

$$P_{FAV} = P_{DM} = U_{T0} \cdot I_{FAV} + r_d \cdot I_{FRMS}^2 = 0,65 \cdot 1 + 0,16 \cdot 9,869 = 2,23 \quad (4)$$

Odpor r_d je určen podle VA charakteristiky z katalogu výrobce.

Teplotní odpor $R_{\theta C-A}$, je rozdíl teplotních odporů $R_{\theta J-A}$ a $R_{\theta J-C}$:

$$R_{\theta C-A} = R_{\theta J-A} - R_{\theta J-C} = 50 - 25 = 25 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (5)$$

Dále je bráno na zřetel, že hodnoty byly počítány pro okolní teplotu 25°C . V prostředí PSpice je výchozí hodnota 27°C , pro správnou funkci musíme hodnotu změnit.

PSpice Model Editor nabízí přidat Smoke i k jiným diodám jako je LED, zenerova dioda, nebo diodový můstek, kde je postup podobný.

Teplotní odpory nejsou sledovanou veličinou v analýze, ale musí být zapsány ve Smoke parametrech, aby analýza fungovala správně. Odpor $R_{\theta C-A}$ se vyjádří jako součet dvou tepelných odporů:

$$R_{\theta C-A} = R_{\theta C-H} + R_{\theta H-A} \quad (6)$$

Pokud analýze ukazuje vysokou teplotu přechodu, lze jí snížit přidáním chladiče – úpravou tepelného odporu $R_{\theta C-A}$.

2.1.6. Tyristor

Modelování hodnot tyristoru je velmi podobné s určováním hodnot diody, není zde zapotřebí znát ztrátový výkon a je zde více hodnot z důvodu, že tyristor má oproti diodě hradlo. Pro určení Smoke parametrů tyristor v pouzdře TO220 typu TIC106M. Výsledné hodnoty jsou zapsané v PSpice Model Editoru (tab. 22).

Katalogové hodnoty [9]:

$$I_{TM} = 30 \text{ A}$$

$$I_{GT} = 200 \text{ } \mu\text{A}$$

$$V_{RRM} = 600 \text{ V}$$

$$V_{DRM} = 600 \text{ V}$$

$$T_A = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_J = 110 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_{\theta J-C} = 1,9 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{\theta J-A} = 62,5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Device Max Ops	Value	Unit
I_T	30	A
I_{GM}	200u	A
V_{RRM}	600	V
V_{DRM}	600	V
T_J	110	$^\circ\text{C}$
R_{JC}	1.9	$^\circ\text{C/W}$
R_{CA}	60,6	$^\circ\text{C/W}$

Tab. 22: Smoke parametry tyristoru.

Výpočtem je zjištěná chybějící hodnota tepelného odporu $R_{\theta C-A} = 60,6 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, dle vzorce (5).

2.1.7. Bipolární tranzistor

V případě bipolárních tranzistorů, ať už PNP, nebo NPN jsou Smoke parametry identické. Pro příklad vytvoření Smoke parametrů (tab. 23) Je uvedena pro NPN tranzistor BC547, jehož starší ekvivalent je KC507.

Katalogové hodnoty [10]; [11]:

$$I_{BM} = 200 \text{ mA}$$

$$I_{CM} = 200 \text{ mA}$$

$$U_{CBO} = 50 \text{ V}$$

$$U_{CEO} = 45 \text{ V}$$

$$U_{EBO} = 5 \text{ V}$$

$$P_{tot} = 500 \text{ mW}$$

$$T_J = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_A = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$R_{\theta J-A} = 250 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

$$R_{\theta J-C} = 83,3 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

Device Max Ops	Value	Unit
I_B	0.2	A
I_C	0.1	A
V_{CB}	50	V
V_{CE}	45	V
V_{EB}	5	V
P_{DM}	0.5	W
T_J	150	C
R_{JC}	83.3	C/W
R_{CA}	166.7	C/W

Tab. 23: Smoke parametry bipolárního tranzistoru.

I v případě bipolárního tranzistoru chybí dopočítat parametr tepelného odporu $R_{\theta C-A}$. Výpočtem je zjištěná chybějící hodnota tepelného odporu $R_{\theta C-A} = 166,7 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$, dle vzorce (5).

PSpice Model Editor umožňuje přidání Smoke parametrů i u Darlingtonova tranzistoru.

2.1.8. MOSFET tranzistor

Pro demonstraci nastavení okna Property Model Editoru je použit tranzistor IRF520, v pouzdře TO220.

Katalogové údaje [14]; [15]:

$$I_D = 9,2 \text{ A}$$

$$I_G = 0,5 \text{ mA}$$

$$V_{DS} = 100 \text{ V}$$

$$V_{DG} = 100 \text{ V}$$

$$T_J = 175 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_A = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$V_{GS} = \pm 20 \text{ V}$$

$$P_{tot} = 70 \text{ W}$$

$$R_{\theta J-C} = 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

$$R_{\theta J-A} = 62 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

Device Max Ops	Value	Unit
I_G	500n	A
I_D	9,2	A
V_{DG}	100	V
V_{DS}	100	V
V_{GSF}	20	V
V_{GSR}	20	V
P_{DM}	70	W
T_J	175	$^{\circ}\text{C}$
R_{JC}	2,5	$^{\circ}\text{C/W}$
R_{CA}	59,5	$^{\circ}\text{C/W}$

Tab. 24: Smoke parametry MOSFET tranzistoru

Výpočtem je zjištěná chybějící hodnota tepelného odporu $R_{\theta C-A} = 59,5 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$, dle vzorce (5). Smoke analýza nabízí nastavení Property Model Editoru i u tranzistorů MESFET.

2.2. Použití analýzy na stabilizovaném zdroji

Zapojení je realizované jako stabilizovaný síťový zdroj, který je napájen ze síťového napětí (obr.11). Dimenzovaný na šest výstupních větví: ± 5 V (obr. 12), ± 12 V (obr. 13) a ± 15 V (obr. 14), každá je konstruována tak, aby se z ní dal odebírat proud 1 A. Analýza v časové oblasti musí být nastavena na teplotu okolí 25 °C, protože použité součástky mají definované parametry právě při takové teplotě. Navržen je transformátor s vyvedeným středem v poměru 1:1. Transformátor pracuje pro sekundární napětí 30 V a indukčnost primární cívky volíme 500 mH. Výpočet potřebné indukčnosti sekundárního vinutí dle vzorce:

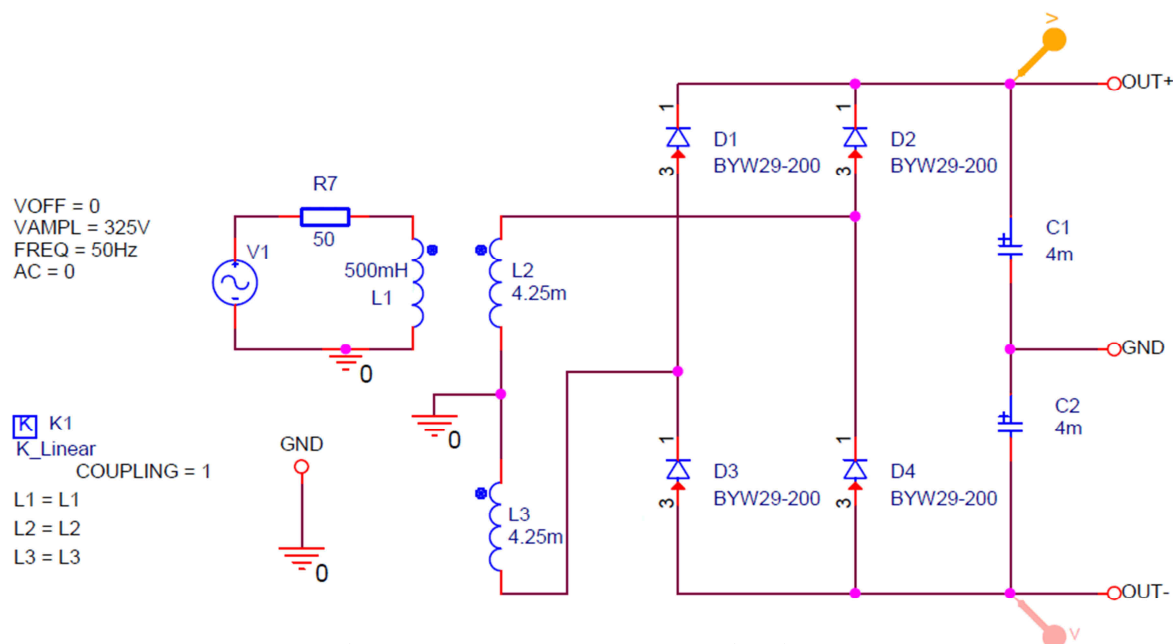
$$k = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \frac{U_2}{U_1} \quad (7)$$

Ze vzorce (11) se vytkne požadovaná veličina L_2 :

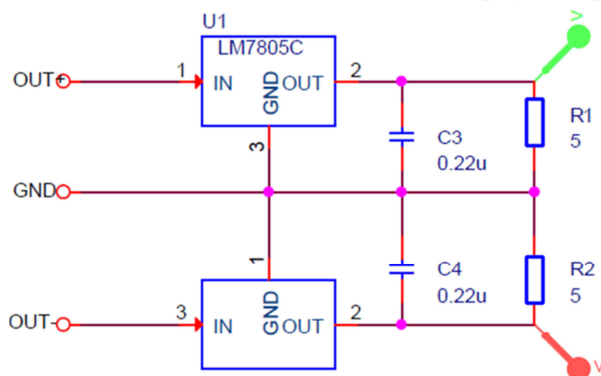
$$L_2 = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \cdot L_1 = \left(\frac{30}{230}\right)^2 \cdot 0,5 = 0,0085 \text{ H} = 8,5 \text{ mH} \quad (8)$$

Jelikož je rozdělený transformátor na dvě stejné části, rozdělí se i jejich indukčnost na dvě stejné části: 4,25 mH. Napěťové průběhy jsou vyobrazeny na obr. 15, s uvedeným popisem v tab. 25.

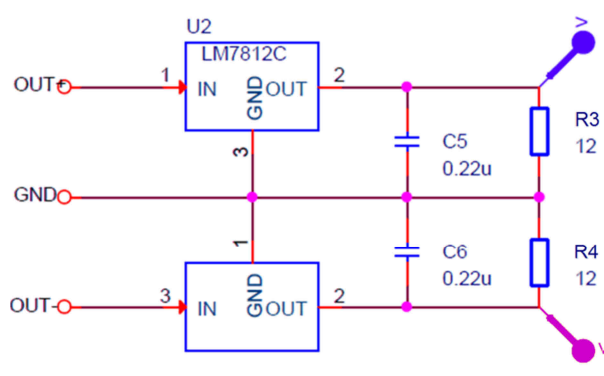
2.2.1. Návrh v OrCADu a průběhy v Probe



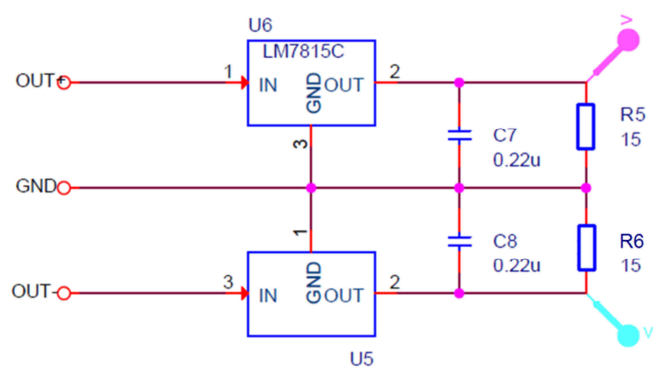
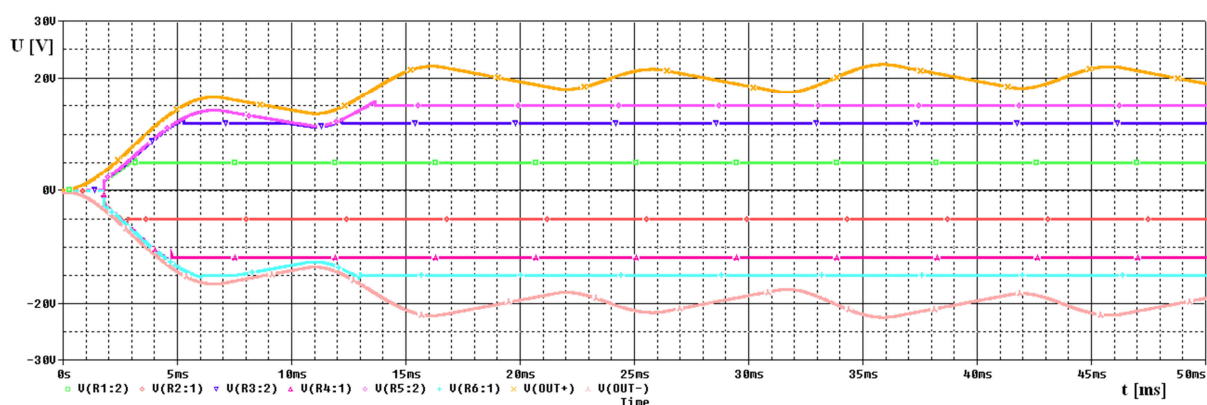
Obr. 11: Zapojení napájecí části obvodu



Obr. 12: Výstupní část ± 5 V



Obr. 13: Výstupní část ± 12 V

Obr. 14: Výstupní část ± 15 V

Obr. 15: Napěťové průběhy zobrazené v Probe

Průběh	Osa x	Osa y	Popis
V(R1:2)	t [ms]	U [V]	Výstupní napětí + 5 V
V(R2:1)	t [ms]	U [V]	Výstupní napětí – 5 V
V(R3:2)	t [ms]	U [V]	Výstupní napětí + 12 V
V(R4:1)	t [ms]	U [V]	Výstupní napětí – 12 V
V(R5:2)	t [ms]	U [V]	Výstupní napětí + 15 V
V(R6:1)	t [ms]	U [V]	Výstupní napětí – 15 V
V(OUT+)	t [ms]	U [V]	Kladné napájecí napětí stabilizačních obvodů
V(OUT-)	t [ms]	U [V]	Záporné napájecí napětí stabilizačních obvodů

Tab. 25: Legenda k napěťovým průběhům stabilizačního obvodu

2.2.2. Smoke analýza

•	Component	Parameter	Type	Rated Value	% Derating	Max Derating	Measured Value	% Max
✓	C1	CVP	Average	50	100	50	20.1043	41
✓	C1	CVP	Peak	50	100	50	22.2465	45
✓	C1	CVP	RMS	50	100	50	20.1503	41
✓	C1	CI	Average	1	100	1	1.6042m	1
✓	C1	CI	Peak	1	100	1	6.5563	656
✓	C1	CI	RMS	1	100	1	3.6447	365
✓	C1	TJL	Average	125	100	125	30.6868m	0
✓	C1	TJL	Peak	125	100	125	131.7015	0
✓	C2	CVP	Average	50	100	50	20.1093	41
✓	C2	CVP	Peak	50	100	50	22.2468	45
✓	C2	CVP	RMS	50	100	50	20.1551	41
✓	C2	CI	Average	1	100	1	1.6034m	1
✓	C2	CI	Peak	1	100	1	6.5563	656
✓	C2	CI	RMS	1	100	1	3.6412	365
✓	C2	TJL	Average	125	100	125	30.6913m	0
✓	C2	TJL	Peak	125	100	125	131.7032	0
✓	C3	CV	Average	50	100	50	4.9893	10
✓	C3	CV	Peak	50	100	50	4.9895	10
✓	C3	CV	RMS	50	100	50	4.9893	10
✓	C3	CI	Average	1	100	1	8.3709p	1
✓	C3	CI	Peak	1	100	1	35.0907n	1
✓	C3	CI	RMS	1	100	1	19.3632n	1
✓	C4	CV	Average	50	100	50	5.0131	11
✓	C4	CV	Peak	50	100	50	5.0143	11
✓	C4	CV	RMS	50	100	50	5.0131	11
✓	C4	CI	Average	1.00	100	1	50.0820p	1
✓	C4	CI	Peak	1.00	100	1	206.5083n	1
✓	C4	CI	RMS	1.00	100	1	115.2672n	1
✓	C5	CV	Average	50	100	50	11.9711	24
✓	C5	CV	Peak	50	100	50	11.9716	24
✓	C5	CV	RMS	50	100	50	11.9711	24
✓	C5	CI	Average	1	100	1	20.5606p	1
✓	C5	CI	Peak	1	100	1	84.9032n	1
✓	C5	CI	RMS	1	100	1	47.4211n	1
✓	C6	CV	Average	50	100	50	11.9857	24
✓	C6	CV	Peak	50	100	50	11.9861	24
✓	C6	CV	RMS	50	100	50	11.9857	24
✓	C6	CI	Average	1	100	1	15.8297p	1
✓	C6	CI	Peak	1	100	1	65.1658n	1
✓	C6	CI	RMS	1	100	1	36.4027n	1
✓	C7	CV	Average	50	100	50	15.1017	31
✓	C7	CV	Peak	50	100	50	15.1023	31
✓	C7	CV	RMS	50	100	50	15.1017	31
✓	C7	CI	Average	1	100	1	25.9473p	1
✓	C7	CI	Peak	1	100	1	107.0432n	1
✓	C7	CI	RMS	1	100	1	59.8130n	1
✓	C8	CV	Average	50	100	50	14.9893	30
✓	C8	CV	Peak	50	100	50	14.9897	30
✓	C8	CV	RMS	50	100	50	14.9893	30
✓	C8	CI	Average	1	100	1	16.0032p	1
✓	C8	CI	Peak	1	100	1	65.8416n	1
✓	C8	CI	RMS	1	100	1	36.7472n	1
✓	D1	IF	Average	8	100	8	1.5462	20
✓	D1	IF	Peak	8	100	8	9.5819	120
✓	D1	PDM	Average	8.00	100	8.00	1.3735	17
✓	D1	PDM	RMS	8.00	100	8.00	3.0504	37
✓	D1	TJ	Average	150	100	150	45.6018	31
✓	D1	TJ	Peak	150	100	150	157.8398	106
✓	D1	VR	RMS	200	100	200	26.3108	14
✓	D2	IF	Average	8	100	8	1.4730	19
✓	D2	IF	Peak	8	100	8	9.3523	117
✓	D2	PDM	Average	8.00	100	8.00	1.3079	16
✓	D2	PDM	RMS	8.00	100	8.00	2.9721	36
✓	D2	TJ	Average	150	100	150	44.6185	30
✓	D2	TJ	Peak	150	100	150	154.2213	103
✓	D2	VR	RMS	200	100	200	26.8372	14
✓	D3	IF	Average	8	100	8	1.4669	19
✓	D3	IF	Peak	8	100	8	9.3402	117
✓	D3	PDM	Average	8.00	100	8.00	1.3025	16
✓	D3	PDM	RMS	8.00	100	8.00	2.9653	36
✓	D3	TJ	Average	150	100	150	44.5373	30
✓	D3	TJ	Peak	150	100	150	154.0302	103
✓	D3	VR	RMS	200	100	200	26.8409	14
✓	D4	IF	Average	8	100	8	1.5399	20
✓	D4	IF	Peak	8	100	8	9.5557	120
✓	D4	PDM	Average	8.00	100	8.00	1.3678	17
✓	D4	PDM	RMS	8.00	100	8.00	3.0434	37
✓	D4	TJ	Average	150	100	150	45.5166	31
✓	D4	TJ	Peak	150	100	150	157.4550	105
✓	D4	VR	RMS	200	100	200	26.3145	14
✓	L1	LI	Average	5	100	5	17.2262m	1
✓	L1	LI	Peak	5	100	5	1.7481	35
✓	L1	LI	RMS	5	100	5	1.3930	28
✓	L1	LV	Average	300	100	300	3.7365	2
✓	L1	LV	Peak	300	100	300	250.0593	84
✓	L1	LV	RMS	300	100	300	187.9340	63

•	Component	Parameter	Type	Rated Value	% Derating	Max Derating	Measured Value	% Max
✓	L2	LI	Average	5	100	5	66.9503m	2
✓	L2	LI	Peak	5	100	5	9.5615	192
✓	L2	LI	RMS	5	100	5	4.7274	95
✓	L2	LV	Average	300	100	300	344.4878m	1
✓	L2	LV	Peak	300	100	300	23.0543	8
✓	L2	LV	RMS	300	100	300	17.3267	6
✓	L3	LI	Average	5	100	5	79.2965m	2
✓	L3	LI	Peak	5	100	5	9.5738	192
✓	L3	LI	RMS	5	100	5	4.7276	95
✓	L3	LV	Average	300	100	300	344.4878m	1
✓	L3	LV	Peak	300	100	300	23.0543	8
✓	L3	LV	RMS	300	100	300	17.3267	6
✓	R1	PDM	Average	250m	0	0	4.9786	< MAX >
✓	R1	PDM	RMS	250m	0	0	4.9786	< MAX >
✓	R1	TB	Average	200	100	200	4.0079k	2004
✓	R1	TB	Peak	200	100	200	4.0082k	2005
✓	R2	PDM	Average	250m	0	0	5.0262	< MAX >
✓	R2	PDM	RMS	250m	0	0	5.0262	< MAX >
✓	R2	TB	Average	200	100	200	4.0459k	2023
✓	R2	TB	Peak	200	100	200	4.0479k	2024
✓	R3	PDM	Average	250m	0	0	11.9423	< MAX >
✓	R3	PDM	RMS	250m	0	0	11.9423	< MAX >
✓	R3	TB	Average	200	100	200	9.5788k	4790
✓	R3	TB	Peak	200	100	200	9.5796k	4790
✓	R4	PDM	Average	250m	0	0	11.9714	< MAX >
✓	R4	PDM	RMS	250m	0	0	11.9714	< MAX >
✓	R4	TB	Average	200	100	200	9.6021k	4802
✓	R4	TB	Peak	200	100	200	9.6028k	4802
✓	R5	PDM	Average	250m	0	0	15.2041	< MAX >
✓	R5	PDM	RMS	250m	0	0	15.2041	< MAX >
✓	R5	TB	Average	200	100	200	12.1882k	6095
✓	R5	TB	Peak	200	100	200	12.1893k	6095
✓	R6	PDM	Average	250m	0	0	14.9786	< MAX >
✓	R6	PDM	RMS	250m	0	0	14.9786	< MAX >
✓	R6	TB	Average	200	100	200	12.0079k	6004
✓	R6	TB	Peak	200	100	200	12.0085k	6005
✓	R7	PDM	Average	250m	0	0	97.0166	< MAX >
✓	R7	PDM	RMS	250m	0	0	105.9784	< MAX >
✓	R7	TB	Average	200	100	200	77.6382k	38820
✓	R7	TB	Peak	200	100	200	122.2644k	61133
✓	U1	VINMAX	Peak	35	100	35	22.2465	64
✓	U1	TJ	Average	150	100	150	146.4985	98
✓	U1	TJ	Peak	150	100	150	163.6995	110
✓	U2	VINMAX	Peak	35	100	35	22.2465	64
✓	U2	TJ	Average	150	100	150	90.7248	231
✓	U2	TJ	Peak	150	100	150	107.9123	287
✓	U3	VINMAX	Peak	25	100	25	22.2468	89
✓	U3	TJ	Average	125	100	125	169.0784	136
✓	U3	TJ	Peak	125	100	125	189.4962	152
✓	U4	VINMAX	Peak	35	100	35	22.2468	64
✓	U4	TJ	Average	125	100	125	310.0324	249
✓	U4	TJ	Peak	125	100	125	384.8682	308
✓	U5	VINMAX	Peak	35	100	35	22.2468	64
✓	U5	TJ	Average	125	100	125	205.1151	165
✓	U5	TJ	Peak	125	100	125	279.9811	224
✓	U6	VINMAX	Peak	35	100	35	22.2465	64
✓	U6	TJ	Average	150	100	150	225.3782	151
✓	U6	TJ	Peak	150	100	150	309.9327	207

Tab. 26: První spuštění Smoke analýzy.

2.2.3. Nastavení jednotlivých součástek

Výsledkem prvního spuštění analýzy (tab. 26) je velká oblast namáhaných součástek. Cílem správného nastavení je zjednodušení analýzy a eliminace nesprávných, chybějících a v analýze prováděných špatných údajů. Analýza byla prováděna bez faktorů odlehčení – Derating.

2.2.4. Kondenzátory C1 – C8

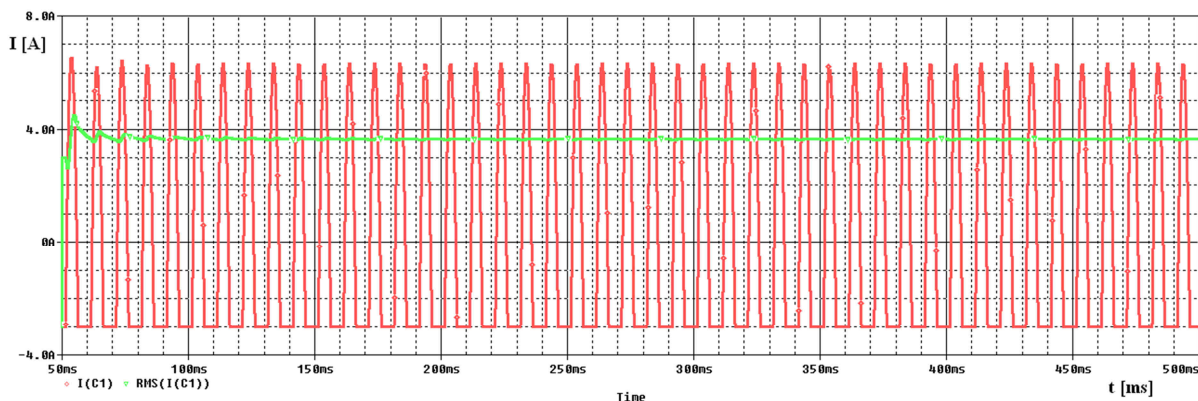
Kondenzátory C1 a C2 jsou stejně zatížené (tab. 27). První sledovanou veličinou je maximální provozní napětí kondenzátorů C_{VP} . Hodnota je ve výchozím nastavení 50 V, podle zatížení bude stačit změnit hodnotu u obou kondenzátorů na 35 V. Druhou sledovanou veličinou je maximální procházející proud kondenzátoru. Při porovnání s průběhy (obr. 16) a popisem průběhů v tab. 28, jde pozorovat, že proudové špičky na kondenzátorech nejsou zanedbatelné, proto se

C1, C2	Average	Peak	RMS
C_{VP}	41 %	45 %	41 %
C_I	1 %	656 %	365 %
T_{JL}	0 %	0 %	-

Tab. 27: Smoke analýza kondenzátorů C1 a C2

změní maximální efektivní hodnotu proudu

C_{MAX} u obou kondenzátorů na 5 A. Špičková hodnota překročí sto procent, které je zanedbatelné, jelikož je dávana do poměru s maximální efektivní hodnotou proudu. Třetí porovnávanou hodnotou je tepelné zatížení kondenzátorů T_{JL} . Žlutá vlaječka nás varuje, že pro správné fungování je zapotřebí nastavit tepelný odpor kondenzátoru R_{TH} , který je pro naše kondenzátory dle tab. 18 hodnota 26,48 °C/W. Navržen kondenzátor o rozměru 22x25 [17]. Dále přidána čtvrtá sledovaná hodnota kondenzátoru, tou je maximální ztrátový výkon P_{DML} . Aby správně analýza fungovala, je důležité zadat hodnotu sériového odporu ESR, který se volí dle tab. 17. Pro náš kondenzátor je nejbližší hodnota $\text{ESR} = 0,05 \Omega$. Nyní lze vypočítat ztrátový výkon kondenzátorů dle vzorce (1) je hodnota ztrátového výkonu $P_{\text{DML}} = 0,664 \text{ W}$.



Obr. 16: Průběhy na kondenzátoru C1.

Průběh	Osa x	Osa y	Popis
I(C1)	t [ms]	I [A]	Proud na kondenzátoru C1
RMS(I(C1))	t [ms]	I [A]	Efektivní hodnota proudu na kondenzátoru C1

Tab. 28: Legenda k průběhům na kondenzátoru C1.

Všechny parametry u elektrolytických kondenzátorů jsou již splněné. Volba kondenzátorů je zohledněna na parametry vypsané v tab. 29.

Parametr	C_{VP}	I_{RMS}	P_{DML}	ESR	T_{JL}	R_{TH}
Hodnota	35 V	5 A	1 W	0,05 Ω	150 °C	26,48 °C/W

Tab. 29: Ideální parametry elektrolytických kondenzátorů C1 a C2.

U kondenzátorů C3 – C8 je první sledovanou hodnotou jejich maximální provozní napětí C_{V} (tab. 31). Z hlediska výchozí nastavené hodnoty analýza pracuje stále v zelených číslech, proto se

C_i	Average	Peak	RMS
C3	1 %	1 %	1 %
C4	1 %	1 %	1 %
C5	1 %	1 %	1 %
C6	1 %	1 %	1 %
C7	1 %	1 %	1 %
C8	1 %	1 %	1 %

Tab. 30: Proudové zatížení kondenzátoru C3 – C8.

C_{V}	Average	Peak	RMS
C3	10 %	10 %	10 %
C4	11 %	11 %	11 %
C5	24 %	24 %	24 %
C6	24 %	24 %	24 %
C7	31 %	31 %	31 %
C8	30 %	30 %	30 %

Tab. 31: Napěťové zatížení kondenzátoru C3 – C8.

sníží hodnota C_V u kondenzátorů C3 – C6 na 16 V a u kondenzátorů C7 a C8 na 25 V. Druhým sledovaným parametrem je maximální pracovní proud procházející kondenzátorem (tab. 30). Jejich výchozí nastavené hodnoty jsou více než dostačující. Kondenzátory neprochází proud větší než ¼ mA.

2.2.5. Diody D1 – D4

Jako usměrňovací diody jsou vybrány diody BYW29-200, robustního provedení v pouzdře TO220 (obr. 17), s pořizovací cenou 13 – 20 Kč za kus. [18], [19]

Smoke analýza ukáže, zda čtveřice těchto diod je dostačující, nebo jestli bude zapotřebí chlazení, nebo jestli podmínky dovolí zvolit menší, levnější diody, které mají nižší maximální hodnoty. Smoke parametry jsou pro lepší přehled vypsány v tab. 32.

Device Max Ops	Value	Unit
I_F	8	A
V_R	200	V
P_{DM}	8.33	W
T_J	150	°C
R_{JC}	2.2	°C/W
R_{CA}	12.8	°C/W

Tab. 32: Smoke Parametry v PSpice Model Editoru.



Obr. 17: Pouzdro TO220, u diody BYW29-200 [19]

První porovnávanou hodnotou diod, je maximální střední hodnota proudu v propustném směru (I_F). Podle tab. 33 lze pozorovat, že při porovnání maximální střední hodnoty se střední hodnotou naměřenou, dochází k velmi malému namáhání diod, zatížení je na dvaceti a devatenácti procentech. Analýza porovnává maximální střední hodnotu i s naměřenou špičkovou hodnotou proudu. Takové porovnání nemá racionální smysl, protože maximální špičková hodnota diody je vyšší než její maximální střední hodnota. Při 120 % je naměřen špičkový proud na diodě D1 a D4 9,58 A. Vychází se z toho, že každou diodou protéká kladná půlvlna sinusového proudu, maximální špičková hodnota je potom rovna $I_m = 50,27$ A, dle rovnice (2):

Znamená to, že naše diody by měly zvládat špičkový proud až 50 A. Z těchto důvodů nebudou špičkové hodnoty proudu v analýze brány v úvahu. Stejným vzorcem, ale s malou úpravou, je proveden výpočet maximální střední hodnoty diody, u které je naměřen špičkový proud 10,4 A.

$$I_{FAVM} = \frac{I_m}{2 \cdot \pi} = \frac{10,4}{2 \cdot \pi} = 1,65 \text{ A.} \quad (9)$$

Z hlediska parametru I_F bude stačit dioda s maximální střední hodnotou propustného proudu do 2 A.

I_F	Average	Peak
D1	20 %	120 %
D2	19 %	117 %
D3	19 %	117 %
D4	20 %	120 %

Tab. 33: Proudové zatížení diod D1 – D4.

Druhou porovnávanou hodnotou je maximální ztrátový výkon na diodě (P_{DM}). Maximální ztrátový výkon je maximální provozní hodnotou, a proto je porovnáována se střední a efektivní naměřenou hodnotou. V tab. 34 lze pozorovat, že všechny diody jsou výkonově zatíženy minimálně. Maximální výkonová ztráta (při 37 % RMS) je 3,05 W.

Naše diody mají maximální ztrátový výkon 8,33 W, znamená to, že pro naši aplikaci budou dostačovat i diody s $P_{DM} = 3,5$ W.

T_J	Average	Peak
D1	31 %	106 %
D2	30 %	103 %
D3	30 %	103 %
D4	31 %	105 %

Tab. 35: Teplotní zatížení diod D1 – D4.

Třetí porovnávanou hodnotou je maximální provozní teplota přechodu (T_J). Katalogová hodnota je zde porovnáována (tab. 35) se střední naměřenou hodnotou, kde je zatížení minimální. V porovnání s teoretickou špičkovou hodnotou teploty, která je pro nás neúčinná, protože samotný přechod se nemůže ohřát ze střední hodnoty 45,52 °C během špičky na 157,46 °C. Z tohoto důvodu o špičková teplotní

hodnota nebude uvažována.

Čtvrtou a zároveň poslední porovnávanou hodnotou (tab. 36) je maximální opakovatelné reversní napětí. V porovnání s naměřenou efektivní hodnotou reversního napětí jsou pozorovatelné značné rezervy. Důležitá je špičková hodnota reversního napětí, pro které bohužel nejsou přímo definovány parametry a hodnoty nemusí být zobrazeny správně a jsou proto zobrazeny šedě. Dají se zobrazit odebráním příkazu *Hide Invalid Values*. Naměřené hodnoty jsou stále v dobré toleranci a nejvyšší naměřené napětí je 45,3 V.

P_{DM}	Average	RMS
D1	17 %	37 %
D2	16 %	36 %
D3	16 %	36 %
D4	17 %	37 %

Tab. 34: Výkonové zatížení diod D1 – D4.

V_R	Peak	RMS
D1	23 %	14 %
D2	23 %	14 %
D3	23 %	14 %
D4	23 %	14 %

Tab. 36: Zatížení diod D1 – D4. Opakovatelným zpětným napětím

2.2.6. Transformátor:

Transformátor je tvořen třemi cívkami L1 až L3. L1 je cívkou primární a cívky L2 a L3 jsou cívkami sekundárními. Při navržení transformátoru nás Smoke analýza upozorňuje na výkonové požadavky, které musí transformátor splňovat. Smoke parametry transformátoru je rozložen na Smoke parametry jednotlivých cívek, jak jsou popsány v bodě 2.1.4, proto jejich zatěžovací parametry jsou ve výchozím nastavení jednotlivých cívek.

Primární vinutí L1

Každá cívka má ve výchozím nastavení maximální pracovní proudovou zatížitelnost 5 A, což je poměrně vysoká hodnota a při pořizování transformátoru by se promítla v ceně. Hodnota maximálního proudu je volena se zanedbáním naměřené špičkové hodnoty, protože je pro nás důležitá maximální provozní hodnota proudu, která nemůže být porovnáována s naměřenými špičkovými parametry (obr. 18) s popisem průběhů v tab. 39. Podle maximální efektivní hodnoty (tab. 37) lze zvolit maximální proudovou zatížitelnost na 2 A. Z pohledu napěťového zatížení je transformátor v pořádku. Je dimenzovaný na maximální napětí 300 V a je zatížen síťovým napětím.

L1	Average	Peak	RMS
L_I	1 %	35 %	28 %
L_V	2 %	84 %	63 %

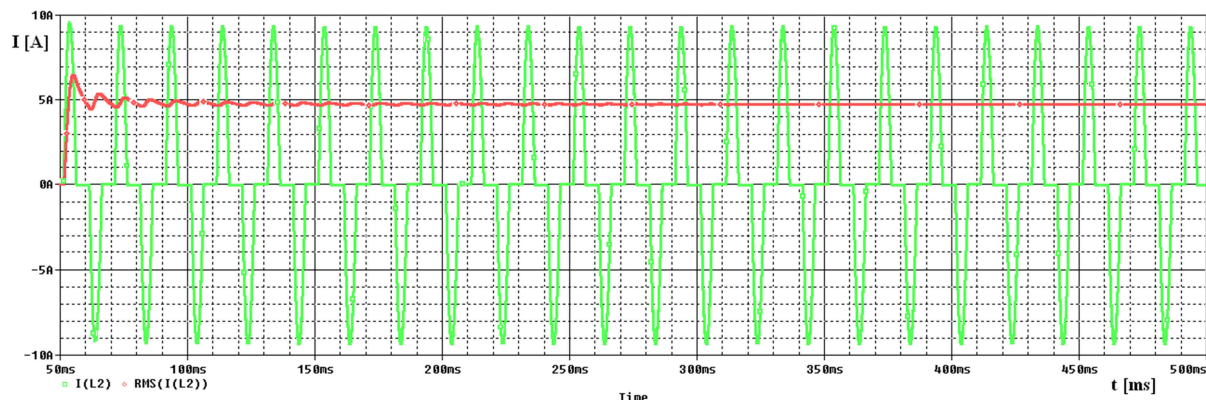
Tab. 37: Proudové zatížení primárního vinutí.

Sekundární vinutí L2 a L3

L2, L3	Average	Peak	RMS
LI	2 %	192 %	95 %
LV	1 %	8 %	6 %

Tab. 38: Proudové zatížení sekundárního vinutí.

Jelikož se jedná o sekundární vinutí, které je vyvedeno středem, jsou cívky L2 a L3 identické a mají i identické Smoke parametry (tab. 38). Volba maximální proudové zatížitelnosti sekundárního vinutí je 5 A. Jedná se o snížovací transformátor, tak napěťová maximální zatížitelnost lze snížit na 50 V a stále je zde pěkná rezerva.



Obr. 18: Proudový průběh na sekundárním vinutí transformátoru.

Průběh	Osa x	Osa y	Popis
I(L2)	t [ms]	I [A]	Proud sekundárního vinutí transformátoru
RMS(I(L2))	t [ms]	I [A]	Efektivní hodnota proudu sekundárního vinutí transformátoru

Tab. 39: Proudový průběh na sekundárním vinutí transformátoru.

2.2.7. Rezistory R1 – R7

Jedná se o uměle vytvořené zátěže. Všechny rezistory mají právě takovou hodnotu, aby odebíraly ze zdroje právě 1 A. Rezistory R1 a R2 jsou ohmické zátěže stabilizátoru ± 5 V. Rezistory R3 a R4 jsou zátěží větve ± 12 V stabilizátoru a rezistory R5 a R6 jsou zátěží větve ± 15 V stabilizátoru. První porovnávanou hodnotou je ztrátový výkon na rezistorech

P _{DM}	Average	RMS
R1	< MAX >	< MAX >
R2	< MAX >	< MAX >
R3	< MAX >	< MAX >
R4	< MAX >	< MAX >
R5	< MAX >	< MAX >
R6	< MAX >	< MAX >

Tab. 40: Výkonové zatížení rezistorů R1 – R6

P_{DM} (tab. 40). Všechny rezistory jsou výkonově $\frac{1}{4}$ W. (výchozí nastavení). Jsou maximálně zatížené, proto se nastaví takový ztrátový výkon, aby vydržely zátěž 1 A. V případě rezistorů R1 a R2 bude ztrátový výkon 15 W. Pro rezistory R3 a R4 ztrátový výkon 30 W a u rezistorů R5 a R6 ztrátový výkon 40 W. Hodnoty jsou zvoleny s větší rezervou podle výsledků Smoke analýzy. Druhá porovnávaná hodnota je teplotní zatížení rezistorů (tab. 41). Zde lze pozorovat velmi vysokou – likvidační teplotu pro rezistory nastavené jako $\frac{1}{4}$ W. Změněním ztrátového výkonu na dostačující se změní i teplotní zatížení. Dle tab. č. 12 bude nastavena i maximální hodnota napětí, která prochází jednotlivými rezistory. Pro R1 až R4 maximální provozní napětí 750 V a pro rezistory R5 a R6 napětí 800 V.

Všechny rezistory jsou výkonově $\frac{1}{4}$ W. (výchozí nastavení). Jsou maximálně zatížené, proto se nastaví takový ztrátový výkon, aby vydržely zátěž 1 A. V případě rezistorů R1 a R2 bude ztrátový výkon 15 W. Pro rezistory R3 a R4 ztrátový výkon

T _B	Average	Peak
R1	2004 %	2005 %
R2	2023 %	2024 %
R3	4790 %	4790 %
R4	4802 %	4802 %
R5	6095 %	6095 %
R6	6004 %	6005 %

Tab. 41: Teplotní zatížení rezistorů R1 – R6

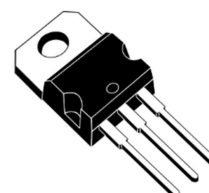
Rezistor R7 není reálným rezistorem v obvodu. Jedná se o odpor cívky primárního vinutí transformátoru. Jelikož je v analýze brán jako malá ohmická zátěž, akumuluje se v ní pomyslný veliký ztrátový výkon (tab. 42). Jelikož samotný rezistor není reálný, jeho analýzu neuvažujeme.		
R7	Average	Peak
PDM	< MAX >	< MAX >
TB	38820 %	61133 %

Tab. 42: Smoke analýza rezistoru R7.

2.2.8. Stabilizátory U1 až U6.

Device Max Ops	U1	U2	U3	U4	U5	U6	Unit
V_{INMAX}	35	35	25	35	35	35	V
T_J	150	150	125	125	125	150	°C
R_{JC}	4	4	5.5	5.5	5.5	4	°C/W
R_{CA}	35	35	29.5	29.5	29.5	35	°C/W

Tab. 43: Nastavení stabilizátorů v PSpice Model Editoru.



Obr. 19: Pouzdro TO220 [19]

První sledovanou veličinou je maximální vstupní napětí V _{INMAX} (tab. 45). Maximální špičková hodnota vstupního napětí je v dobré toleranci a nemusí zde být nic měněno. Druhou sledovanou veličinou je teplota přechodu pouzdra (tab. 44). Stabilizátory mají maximální proudovou zatížitelnost 1 A a právě na této hodnotě se pohybují. Aby stabilizátory vydržely maximální zatížení, Musí se dostatečně chladit. Pro návrh chladiče se bude vycházet s návrhem použitím robustního chladiče [20] s tepelným odporem R _{9H-A} = 2,7 °C/W, se stykem s teplovodivou silikonovou vložkou pod pouzdro TO220 [21] s tepelným odporem - R _{9C-H} = 0,3 °C/W. Celkový odpor R _{CA} je vyjádřen dle vzorce (6) Výsledná hodnota R _{9C-A} je rovna 3 °C/W		
T_J	Average	Peak
U1	98 %	110 %
U2	231 %	287 %
U3	136 %	152 %
U4	249 %	308 %
U5	165 %	224 %
U6	151 %	207 %

Tab. 44: Teplotní zatížení stabilizátorů U1 – U6.

V_{INMAX}	Peak
U1	64 %
U2	64 %
U3	89 %
U4	64 %
U5	64 %
U6	64 %

Tab. 45: Zatížení maximálního vstupního napětí stabilizátorů.

Nyní se tato hodnota přepíše v PSpice Model Editoru ke každému z uvedených stabilizátorů, tím se docílí snížení teploty přechodu na bezpečnou úroveň a delší životnosti stabilizátorů.

2.2.9. Druhé spuštění Smoke analýzy

•	Component	Parameter	Type	Rated Value	% Derating	Max Derating	Measured Value	% Max
✓	C1	CVP	Average	35	100	35	20.1043	58
✓	C1	CVP	Peak	35	100	35	22.2465	64
✓	C1	CVP	RMS	35	100	35	20.1503	58
✓	C1	CI	Average	5	100	5	1.6042m	1
✓	C1	CI	RMS	5	100	5	3.6447	73
✓	C1	PDML	Average	1	100	1	664.1848m	67
✓	C1	PDML	RMS	1	100	1	664.1848m	67
✓	C1	TJL	Average	125	100	125	42.5876	34
✓	C1	TJL	Peak	125	100	125	51.7126	41
✓	C2	CVP	Average	35	100	35	20.1093	58
✓	C2	CVP	Peak	35	100	35	22.2468	64
✓	C2	CVP	RMS	35	100	35	20.1551	58
✓	C2	CI	Average	5	100	5	1.6034m	1
✓	C2	CI	RMS	5	100	5	3.6412	73
✓	C2	PDML	Average	1	100	1	662.9348m	67
✓	C2	PDML	RMS	1	100	1	662.9348m	67
✓	C2	TJL	Average	125	100	125	42.5545	34
✓	C2	TJL	Peak	125	100	125	51.7202	41
✓	C3	CV	Average	16	100	16	4.9893	32
✓	C3	CV	Peak	16	100	16	4.9895	32
✓	C3	CV	RMS	16	100	16	4.9893	32
✓	C3	CI	Average	1	100	1	8.3709p	1
✓	C3	CI	Peak	1	100	1	35.0907n	1
✓	C3	CI	RMS	1	100	1	19.3632n	1
✓	C4	CV	Average	16	100	16	5.0131	32
✓	C4	CV	Peak	16	100	16	5.0143	32
✓	C4	CV	RMS	16	100	16	5.0131	32
✓	C4	CI	Average	1	100	1	50.0820p	1
✓	C4	CI	Peak	1	100	1	206.5083n	1
✓	C4	CI	RMS	1	100	1	115.2672n	1
✓	C5	CV	Average	16	100	16	11.9711	75
✓	C5	CV	Peak	16	100	16	11.9716	75
✓	C5	CV	RMS	16	100	16	11.9711	75
✓	C5	CI	Average	1	100	1	20.5606p	1
✓	C5	CI	Peak	1	100	1	84.9032n	1
✓	C5	CI	RMS	1	100	1	47.4211n	1
✓	C6	CV	Average	16	100	16	11.9857	75
✓	C6	CV	Peak	16	100	16	11.9861	75
✓	C6	CV	RMS	16	100	16	11.9857	75
✓	C6	CI	Average	1	100	1	15.8297p	1
✓	C6	CI	Peak	1	100	1	65.1658n	1
✓	C6	CI	RMS	1	100	1	36.4027n	1
✓	C7	CV	Average	25	100	25	15.1017	61
✓	C7	CV	Peak	25	100	25	15.1023	61
✓	C7	CV	RMS	25	100	25	15.1017	61
✓	C7	CI	Average	1	100	1	25.9473p	1
✓	C7	CI	Peak	1	100	1	107.0432n	1
✓	C7	CI	RMS	1	100	1	59.8130n	1
✓	C8	CV	Average	25	100	25	14.9893	60
✓	C8	CV	Peak	25	100	25	14.9897	60
✓	C8	CV	RMS	25	100	25	14.9893	60
✓	C8	CI	Average	1	100	1	16.0032p	1
✓	C8	CI	Peak	1	100	1	65.8416n	1
✓	C8	CI	RMS	1	100	1	36.7472n	1
✓	D1	IF	Average	8	100	8	1.5462	20
✓	D1	PDM	Average	8.00	100	511554	1.3735	17
✓	D1	PDM	RMS	8.00	100	511554	3.0504	37
✓	D1	TJ	Average	150	100	150	45.6018	31
✓	D1	VR	RMS	200	100	200	26.3108	14
✓	D2	IF	Average	8	100	8	1.4730	19
✓	D2	PDM	Average	8.00	100	511554	1.3079	16
✓	D2	PDM	RMS	8.00	100	511554	2.9721	36
✓	D2	TJ	Average	150	100	150	44.6185	30
✓	D2	VR	RMS	200	100	200	26.8372	14
✓	D3	IF	Average	8	100	8	1.4669	19
✓	D3	PDM	Average	8.00	100	511554	1.3025	16
✓	D3	PDM	RMS	8.00	100	511554	2.9653	36
✓	D3	TJ	Average	150	100	150	44.5373	30
✓	D3	VR	RMS	200	100	200	26.8409	14
✓	D4	IF	Average	8	100	8	1.5399	20
✓	D4	PDM	Average	8.00	100	511554	1.3678	17
✓	D4	PDM	RMS	8.00	100	511554	3.0434	37
✓	D4	TJ	Average	150	100	150	45.5166	31
✓	D4	VR	RMS	200	100	200	26.3145	14
✓	L1	LI	Average	2	100	2	17.2262m	1
✓	L1	LI	Peak	2	100	2	1.7481	88
✓	L1	LI	RMS	2	100	2	1.3930	70
✓	L1	LV	Average	300	100	300	3.7365	2
✓	L1	LV	Peak	300	100	300	250.0593	84
✓	L1	LV	RMS	300	100	300	187.9340	63
✓	L2	LI	Average	5	100	5	66.9503m	2
✓	L2	LV	Average	50	100	50	344.4878m	1
✓	L2	LV	Peak	50	100	50	23.0543	47
✓	L2	LV	RMS	50	100	50	17.3267	35
✓	L3	LI	Average	5	100	5	79.2965m	2
✓	L3	LV	Average	50	100	50	344.4878m	1
✓	L3	LV	Peak	50	100	50	23.0543	47
✓	L3	LV	RMS	50	100	50	17.3267	35
✓	R1	PDM	Average	15	54	8.1464	4.9786	62

2. Použití Smoke analýzy

•	Component	Parameter	Type	Rated Value	% Derating	Max Derating	Measured Value	% Max
✓	R1	PDM	RMS	15	54	8.1464	4.9786	62
✓	R1	RV	Average	750	100	750	4.9893	1
✓	R1	RV	Peak	750	100	750	4.9895	1
✓	R1	RV	RMS	750	100	750	4.9893	1
✓	R1	TB	Average	200	100	200	91.3816	46
✓	R1	TB	Peak	200	100	200	91.3869	46
✓	R2	PDM	Average	15	53	8.0988	5.0262	63
✓	R2	PDM	RMS	15	53	8.0988	5.0262	63
✓	R2	RV	Average	750	100	750	5.0131	1
✓	R2	RV	Peak	750	100	750	5.0143	1
✓	R2	RV	RMS	750	100	750	5.0131	1
✓	R2	TB	Average	200	100	200	92.0158	47
✓	R2	TB	Peak	200	100	200	92.0486	47
✓	R3	PDM	Average	30	47	14.3077	11.9423	84
✓	R3	PDM	RMS	30	47	14.3077	11.9423	84
✓	R3	RV	Average	750	100	750	11.9711	2
✓	R3	RV	Peak	750	100	750	11.9716	2
✓	R3	RV	RMS	750	100	750	11.9711	2
✓	R3	TB	Average	200	100	200	104.6153	53
✓	R3	TB	Peak	200	100	200	104.6221	53
✓	R4	PDM	Average	30	47	14.2786	11.9714	84
✓	R4	PDM	RMS	30	47	14.2786	11.9714	84
✓	R4	RV	Average	750	100	750	11.9857	2
✓	R4	RV	Peak	750	100	750	11.9861	2
✓	R4	RV	RMS	750	100	750	11.9857	2
✓	R4	TB	Average	200	100	200	104.8095	53
✓	R4	TB	Peak	200	100	200	104.8146	53
✓	R5	PDM	Average	40	49	19.7959	15.2041	77
✓	R5	PDM	RMS	40	49	19.7959	15.2041	77
✓	R5	RV	Average	800	100	800	15.1017	2
✓	R5	RV	Peak	800	100	800	15.1023	2
✓	R5	RV	RMS	800	100	800	15.1017	2
✓	R5	TB	Average	200	100	200	101.0203	51
✓	R5	TB	Peak	200	100	200	101.0267	51
✓	R6	PDM	Average	40	50	20.0214	14.9786	75
✓	R6	PDM	RMS	40	50	20.0214	14.9786	75
✓	R6	RV	Average	800	100	800	14.9893	2
✓	R6	RV	Peak	800	100	800	14.9897	2
✓	R6	RV	RMS	800	100	800	14.9893	2
✓	R6	TB	Average	200	100	200	99.8932	50
✓	R6	TB	Peak	200	100	200	99.8971	50
✓	U1	VINMAX	Peak	35	100	35	22.2465	64
✓	U1	TJ	Average	150	100	150	95.3152	64
✓	U1	TJ	Peak	150	100	150	113.4234	76
✓	U2	VINMAX	Peak	35	100	35	22.2465	64
✓	U2	TJ	Average	150	100	150	82.5092	56
✓	U2	TJ	Peak	150	100	150	97.5482	66
✓	U3	VINMAX	Peak	25	100	25	22.2468	89
✓	U3	TJ	Average	125	100	125	99.5681	80
✓	U4	VINMAX	Peak	35	100	35	22.2468	64
✓	U4	TJ	Average	125	100	125	94.2221	76
✓	U4	TJ	Peak	125	100	125	112.3966	90
✓	U5	VINMAX	Peak	35	100	35	22.2468	64
✓	U5	TJ	Average	125	100	125	68.7422	55
✓	U5	TJ	Peak	125	100	125	86.9240	70
✓	U6	VINMAX	Peak	35	100	35	22.2465	64
✓	U6	TJ	Average	150	100	150	60.9653	41
✓	U6	TJ	Peak	150	100	150	76.1418	51

Tab. 46: Druhé spuštění Smoke analýzy – výběr zelených hodnot do 90%.




Při druhém rozjezdu Smoke analýzy nás hlavně zajímají hodnoty, které se nacházejí ve žlutých a červených oblastech v tab. 47 a 48. Většina hodnot je již spravená (tab. 46).

•	Component	Parameter	Type	Rated Value	% Derating	Max Derating	Measured Value	% Max
✓	C1	CI	Peak	5	100	5	6.5563	132
✓	C2	CI	Peak	5	100	5	6.5563	132
✓	D1	IF	Peak	8	100	8	9.5819	120
✓	D1	TJ	Peak	150	100	150	157.8398	106
✓	D2	IF	Peak	8	100	8	9.3523	117
✓	D2	TJ	Peak	150	100	150	154.2213	103
✓	D3	IF	Peak	8	100	8	9.3402	117
✓	D3	TJ	Peak	150	100	150	154.0302	103
✓	D4	IF	Peak	8	100	8	9.5557	120
✓	D4	TJ	Peak	150	100	150	157.4550	105
✓	L2	LI	Peak	5	100	5	9.5615	192
✓	L3	LI	Peak	5	100	5	9.5738	192
✓	R7	PDM	Average	250m	0	0	97.0166	< MAX >
✓	R7	PDM	RMS	250m	0	0	105.9784	< MAX >
✓	R7	TB	Average	200	100	200	77.6382k	38820
✓	R7	TB	Peak	200	100	200	122.2644k	61133

Tab. 47: Druhé spuštění Smoke analýzy – výběr hodnot od 101 %.

Překročené hodnoty u kondenzátorů, diod a cívky sekundárního transformátoru jsou naměřené špičkové hodnoty (tab. 47), které jsou dávány do poměru se střední, anebo efektivní maximální hodnotou. Překročení maximálních hodnot rezistoru R7 je v pořádku, protože se nejedná o skutečný rezistor. Všechny tyto parametry jsou již popsány výše a nejedná se o chybu schématu zapojení.

Tyto tři hodnoty, které se nacházejí ve žlutých oblastech (tab. 48), jsou výstrahou a dávají prostor k uvažování, zda by se mělo uvažovat s vyšší maximální hodnotou proudového zatížení pro sekundární vinutí transformátoru. Vyšší hodnotu u stabilizátoru U3 nemusí být uvažována, jelikož se jedná o špičkovou hodnotu teploty, která se reálně nemůže na stabilizátoru vyskytnout.

*	Component	Parameter	Type	Rated Value	% Derating	Max Derating	Measured Value	% Max
	L2	LI	RMS	5	100	5	4.7274	95
	L3	LI	RMS	5	100	5	4.7276	95
	U3	TJ	Peak	125	100	125	118.2358	95

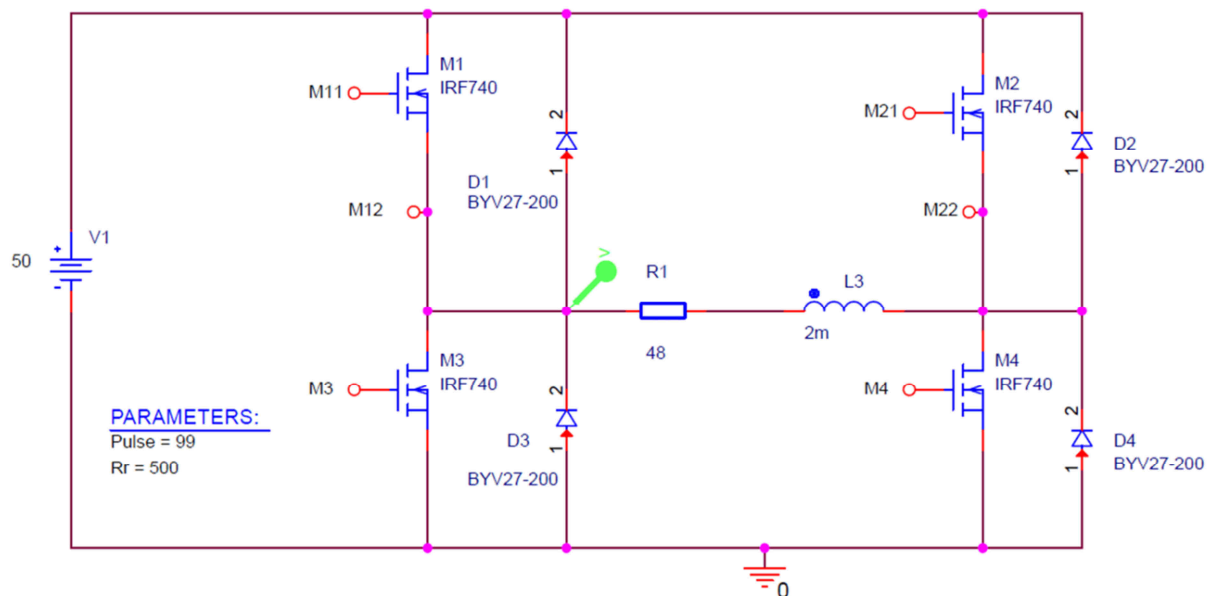
Tab. 48: Druhé spuštění Smoke analýzy – výběr hodnot od 91 do 100 %

2.3. Použití analýzy na čtyřkvadrantovém DC/DC měniči

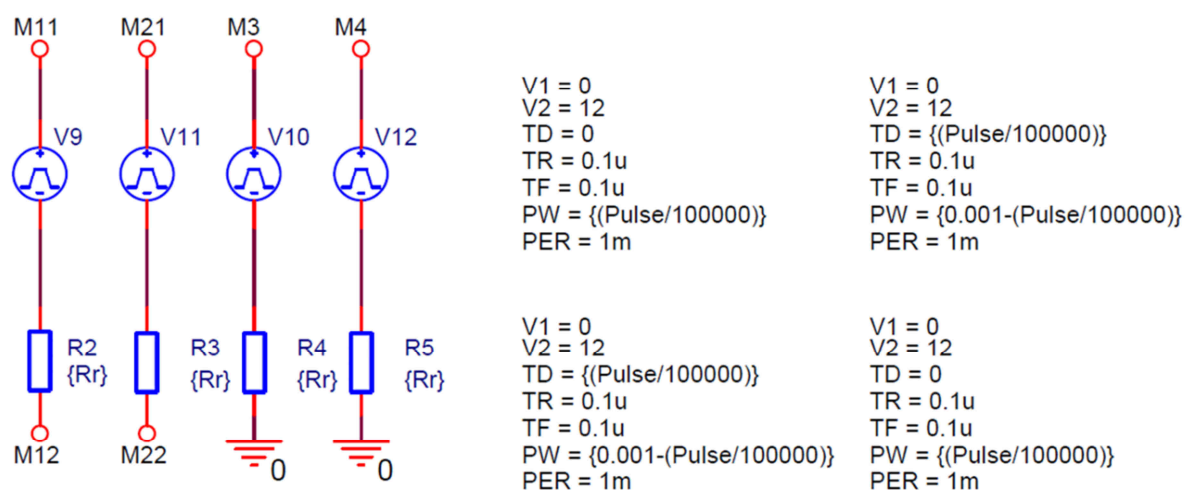
Jako druhý příklad pro demonstraci Smoke analýzy je použito zapojení čtyřkvadrantového DC/DC měniče (obr. 19). Měnič je řízen unipolárně (obr. 20), každý tranzistor je řízený pulzně pomocí funkce Param v OrCADu. Řízení je sestaveno se zanedbáním mrtvých dob u spínání jednotlivých tranzistorů. Na obr. 21, lze vidět vliv průběhu napětí na zátěži při změně střídry řízení. Pro Smoke analýzy byla vybrána právě taková střída, při které je namáhání součástek největší. To bylo určeno podle změny střídry řízení a opětovného spuštění Smoke analýzy. Data byly sepsány do tabulky a jejich grafický výstup je uveden na obr. 22. Podle těchto průběhů bude nastavena střída 99 % pro Smoke analýzu.

V demonstraci prvního příkladu byla použita možnost bez odlehčení parametrů, proto v tomto případě volíme standardní odlehčení.

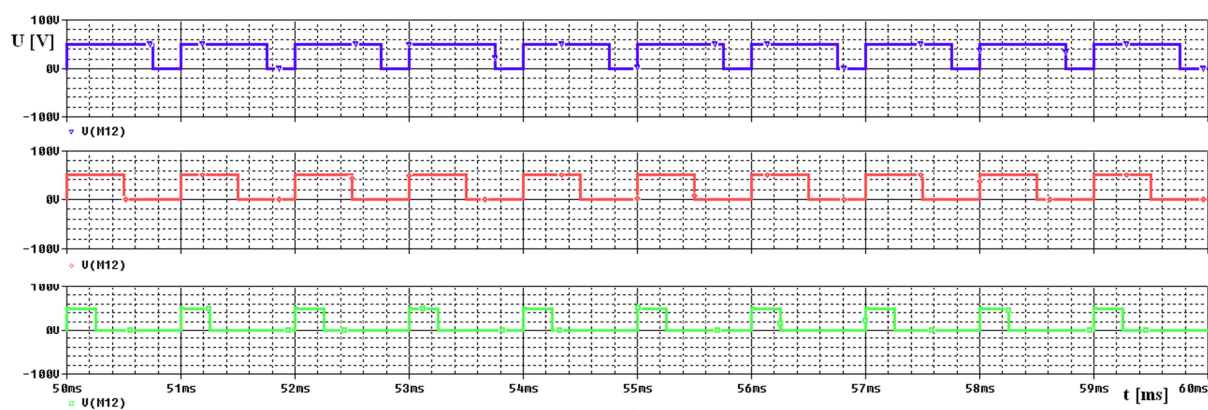
2.3.1. Návrh zapojení v OrCADu a průběhy v Probe.



Obr. 19: Zapojení čtyřkvadrantového DC/DC měniče



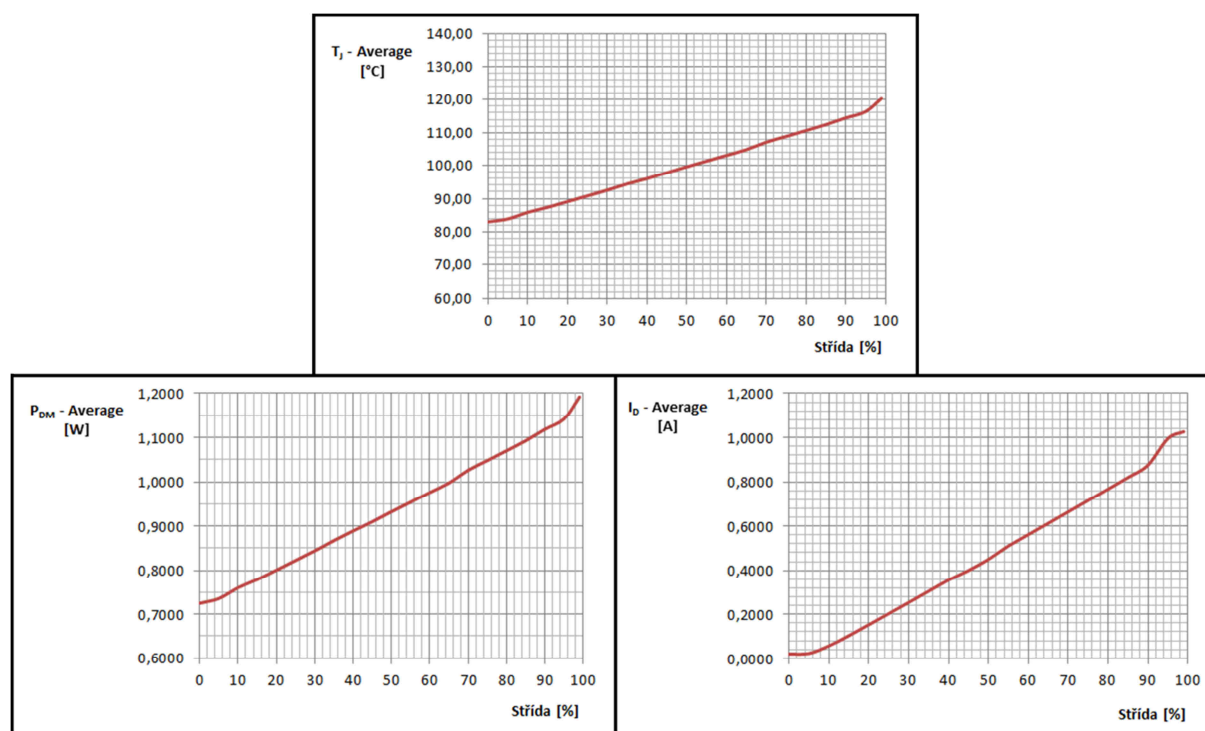
Obr. 20: Řízení čtyřkvadrantového DC/DC měniče



Obr. 21: Průběhy na RL zátěži při různé střídě DC/DC měniče

Průběh	Osa x	Osa y	Popis
V(M12)	t [ms]	U [V]	Napětí na měniči při střídě 25 %
V(M12)	t [ms]	U [V]	Napětí na měniči při střídě 50 %
V(M12)	t [ms]	U [V]	Napětí na měniči při střídě 75 %

Tab. 49: Legenda k průběhům čtyřkvadrantového DC/DC měniče



Obr. 22: Přehled zatížení jednotlivých parametrů při rostoucí střídě

2.3.2. Smoke analýza

•	Component	Parameter	Type	Rated Value	% Derating	Max Derating	Measured Value	% Max
✓	D1	IF	Average	2	80	1.6000	440.8168n	1
✓	D1	IF	Peak	2	80	1.6000	4.0048m	1
✓	D1	PDM	Average	1.5000	75	1.1250	260.4435n	1
✓	D1	PDM	RMS	1.5000	75	1.1250	1.7459m	1
✓	D1	TJ	Average	175	100	175	25	15
✓	D1	TJ	Peak	175	100	175	25	15
✓	D1	VR	RMS	200	50	100	24.8459	25
✓	D2	IF	Average	2	80	1.6000	208.9215n	1
✓	D2	IF	Peak	2	80	1.6000	3.5119m	1
✓	D2	PDM	Average	1.5000	75	1.1250	7.6778u	1
✓	D2	PDM	RMS	1.5000	75	1.1250	1.9372m	1
✓	D2	TJ	Average	175	100	175	25	15
✓	D2	TJ	Peak	175	100	175	25	15
✓	D2	VR	RMS	200	50	100	42.9656	43
✓	D3	IF	Average	2	80	1.6000	208.9215n	1
✓	D3	IF	Peak	2	80	1.6000	3.5119m	1
✓	D3	PDM	Average	1.5000	75	1.1250	7.6778u	1
✓	D3	PDM	RMS	1.5000	75	1.1250	1.9372m	1
✓	D3	TJ	Average	175	100	175	25	15
✓	D3	TJ	Peak	175	100	175	25	15
✓	D3	VR	RMS	200	50	100	42.9656	43
✓	D4	IF	Average	2	80	1.6000	440.8168n	1
✓	D4	IF	Peak	2	80	1.6000	4.0048m	1
✓	D4	PDM	Average	1.5000	75	1.1250	260.4435n	1
✓	D4	PDM	RMS	1.5000	75	1.1250	1.7459m	1
✓	D4	TJ	Average	175	100	175	25	15
✓	D4	TJ	Peak	175	100	175	25	15
✓	D4	VR	RMS	200	50	100	24.8459	25
✓	L1	LV	Average	300	90	270	22.6321m	1
✓	L1	LV	RMS	300	90	270	20.3331	8
✓	L1	LI	Average	5	90	4.5000	512.4381m	12
✓	L1	LI	RMS	5	90	4.5000	940.4508m	21
✓	L1	LI	Peak	5	90	4.5000	1.0254	23
✓	L1	LV	Peak	300	90	270	98.1559	37
✓	M1	IG	Average	500n	100	500n	-49.7882n	0
✓	M1	VGSR	Peak	20	100	20	1.3176m	1
✓	M1	ID	Average	10	80	8	715.6136m	9
✓	M1	VDG	Peak	400	100	400	50.3128	13
✓	M1	VDS	Peak	400	90	360	50.4178	15
✓	M1	VGSR	Peak	20	100	20	12.0008	61
✓	M1	TJ	Average	150	100	150	108.8539	73
✓	M1	PDM	Average	1.5625	75	1.1719	1.0482	90
✓	M1	ID	Peak	10	80	8	23.1343	290
✓	M1	TJ	Peak	150	100	150	351.0539	236
✓	M1	PDM	RMS	1.5625	0	0	20.7524	< MAX >
✓	M2	IG	Average	500n	100	500n	-18.7966n	0
✓	M2	VGSR	Peak	20	100	20	1.3635m	1
✓	M2	ID	Average	10	80	8	203.1782m	3
✓	M2	VDG	Peak	400	100	400	50.3179	13
✓	M2	VDS	Peak	400	90	360	50.4177	15
✓	M2	TJ	Average	150	100	150	90.8026	61
✓	M2	VGSR	Peak	20	100	20	12.0007	61
✓	M2	PDM	Average	1.5625	75	1.1719	822.5329m	71
✓	M2	ID	Peak	10	80	8	23.4168	293
✓	M2	TJ	Peak	150	100	150	238.8384	197
✓	M2	PDM	RMS	1.5625	0	0	20.4526	< MAX >
✓	M3	IG	Average	500n	100	500n	-18.7966n	0
✓	M3	VGSR	Peak	20	100	20	1.3635m	1
✓	M3	ID	Average	10	80	8	203.1782m	3
✓	M3	VDG	Peak	400	100	400	50.3179	13
✓	M3	VDS	Peak	400	90	360	50.4177	15
✓	M3	TJ	Average	150	100	150	90.8026	61
✓	M3	VGSR	Peak	20	100	20	12.0007	61
✓	M3	PDM	Average	1.5625	75	1.1719	822.5329m	71
✓	M3	ID	Peak	10	80	8	23.4168	293
✓	M3	TJ	Peak	150	100	150	238.8384	197
✓	M3	PDM	RMS	1.5625	0	0	20.4526	< MAX >
✓	M4	IG	Average	500n	100	500n	-49.7882n	0
✓	M4	VGSR	Peak	20	100	20	1.3176m	1
✓	M4	ID	Average	10	80	8	715.6136m	9
✓	M4	VDG	Peak	400	100	400	50.3128	13
✓	M4	VDS	Peak	400	90	360	50.4178	15
✓	M4	VGSR	Peak	20	100	20	12.0008	61
✓	M4	TJ	Average	150	100	150	108.8539	73
✓	M4	PDM	Average	1.5625	75	1.1719	1.0482	90
✓	M4	ID	Peak	10	80	8	23.1343	290
✓	M4	TJ	Peak	150	100	150	351.0539	236
✓	M4	PDM	RMS	1.5625	0	0	20.7524	< MAX >
✓	R1	TB	Average	200	100	200	33.9878k	16994
✓	R1	TB	Peak	200	100	200	40.4043k	20203
✓	R1	PDM	Average	250m	0	0	42.4535	< MAX >
✓	R1	PDM	RMS	250m	0	0	44.8453	< MAX >
✓	R2	PDM	Average	250m	48	120.1441m	306.2449u	1
✓	R2	PDM	RMS	250m	46	116.9911m	6.0388m	6
✓	R2	TB	Average	200	100	200	25.2450	13
✓	R2	TB	Peak	200	100	200	229.2395	115
✓	R3	PDM	Average	250m	48	120.1438m	306.7311u	1
✓	R3	PDM	RMS	250m	46	116.9859m	6.0484m	6
✓	R3	TB	Average	200	100	200	25.2454	13
✓	R3	TB	Peak	200	100	200	229.2395	115

	Component	Parameter	Type	Rated Value	% Derating	Max Derating	Measured Value	% Max
	R4	PDM	Average	250m	48	120.1438m	306.7311u	1
	R4	PDM	RMS	250m	46	116.9859m	6.0484m	6
	R4	TB	Average	200	100	200	25.2454	13
	R4	TB	Peak	200	100	200	229.2395	115
	R5	PDM	Average	250m	48	120.1441m	306.2449u	1
	R5	PDM	RMS	250m	46	116.9911m	6.0388m	6
	R5	TB	Average	200	100	200	25.2450	13
	R5	TB	Peak	200	100	200	229.2395	115

Tab. 50: Smoke analýza čtyřkvadrantového DC/DC měniče

2.3.3. Nastavení jednotlivých součástek

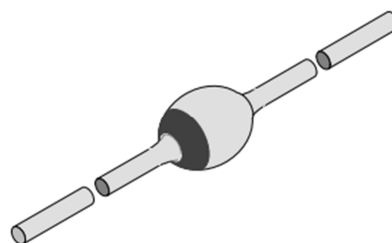
Spuštění analýzy vykazuje spoustu namáhaných součástek a jejich parametrů (tab. 50). Cílem správného nastavení je zjednodušení analýzy a eliminace nesprávných, chybějících a v analýze prováděných špatných údajů.

2.3.4. Diody D1 – D4

Jako usměrňovací diody jsme zvolili diody BYV27-200 v keramickém pouzdře SOD57 [5]. Smoke analýza nás varuje žlutou vlajčkou u hodnot P_{DM} , že chybí hodnoty tepelných odporů, aby analýza fungovala správně.

Device Max Ops	Value	Unit
I_F	2	A
V_R	200	V
P_{DM}	1.5	W
T_J	175	°C
R_{JC}		°C/W
R_{CA}		°C/W

Tab. 51: Smoke Parametry v PSpice Model Editoru



Obr. 17: Pouzdro SOD57 [5]

První porovnávanou hodnotou diod je maximální střední hodnota proudu v propustném směru (I_F). Podle tab. 52 lze spatřit, že při porovnání maximální střední hodnoty se střední hodnotou naměřenou dochází k velmi malému namáhání diod. Zatížení je na jednom procentu. Porovnání špičkové naměřené hodnoty je rovněž na velmi nízké úrovni a diody pracují správně.

I_F	Average	Peak
D1 – D4	1 %	1 %

Tab. 52: Proudové zatížení diod D1 – D4

Druhou porovnávanou hodnotou je maximální ztrátový výkon na diodě (P_{DM}). Diody jsou podle analýzy zatíženy jen minimálně (tab. 53). Tento údaj je chybný, protože chybí hodnoty tepelných odporů diody, které se nacházejí v katalogovém listu výrobce [5]:

$$R_{9J-C} = 46 \text{ °C/W}$$

$$R_{9J-A} = 100 \text{ °C/W}$$

Hodnotu R_{9J-C} se vepíše do PSpice Model Editoru do položky R_{JC} .

Tepelný odpor R_{CA} se zjistí podle vzorce (5) a je roven hodnotě

54 °C/W: Nyní je vypočtený i odpor R_{CA} , který bude vložen do PSpice Model Editoru, změna se projeví při dalším spuštění Smoke analýzy.

T_J	Average	Peak
D1 – D4	15 %	15 %

Tab. 54: Teplotní zatížení diod D1 – D4

již správně.

Třetí porovnávanou hodnotou je maximální provozní teplota přechodu (T_J). Katalogová hodnota je zde porovnávaná (tab. 54) se střední naměřenou hodnotou, kde je zatížení minimální. Z důvodu chybějících tepelných odporů je teplota přechodu rovna s teplotou okolí – 25 °C. Po přidání tepelných odporů a při druhém spuštění Smoke analýzy se hodnoty ukážou

P_{DM}	Average	RMS
D1 – D4	1 %	1 %

Tab. 53: Výkonové zatížení diod D1 – D4

Čtvrtou a zároveň poslední porovnávanou hodnotou (tab. 55) je maximální opakovatelné reversní napětí. V porovnání s naměřenou efektivní hodnotou reversního napětí se nacházejí značné rezervy. Důležitá je špičková hodnota reversního napětí, pro které bohužel nejsou přímo definovány parametry a hodnoty nemusí být zobrazeny správně a jsou proto zobrazeny šedě. Zobrazí se odebráním příkazu *Hide Invalid Values*. Naměřené hodnoty jsou stále v dobré toleranci a nejvyšší naměřené napětí je 50,42 V.

V_R	Peak	RMS
D1	51 %	25 %
D2	51 %	43 %
D3	51 %	43 %
D4	51 %	25 %

Tab. 55: Zatížení diod D1 – D4. Opakovatelným zpětným napětím

2.3.5. Cívka L1

Každá cívka má ve výchozím nastavení maximální pracovní proudovou zatížitelnost 5 A, což je poměrně vysoká hodnota a při pořizování cívky by se tento návrh promítl v ceně. Hodnotu maximálního proudu budeme volit se zanedbáním naměřené špičkové hodnoty, protože je důležitá maximální provozní hodnota proudu, která nemůže být porovnávána s naměřenými špičkovými parametry. Podle maximální efektivní hodnoty (tab. 56) se zvolí maximální proudová zatížitelnost na 2 A. Z pohledu napěťového zatížení je cívka v pořádku, dimenzovaná na maximální napětí 300 V a zatížení je minimální, proto se nastaví hodnota L_V na hodnotu 75 V.

L1	Average	Peak	RMS
L_I	12 %	23 %	21 %
L_V	1 %	37 %	8 %

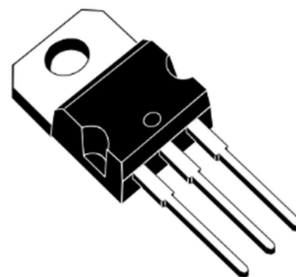
Tab. 56: Proudové zatížení primárního vinutí

2.3.6. MOSFET tranzistory M1 – M4

Pro spínací účely byla vybrána čtveřice MOSFET tranzistorů IRF740 v pouzdře TO220 (obr. 18). Vyhodnocením Smoke analýzy bude zjištění potencionálního chlazení těchto tranzistorů. Přehled maximálních parametrů v PSpice model editoru je v tab. 57.

Device Max Ops	Value	Unit
I_G	500n	A
I_D	10	A
V_{DG}	400	V
V_{DS}	400	V
V_{GSF}	20	V
V_{GSR}	20	V
P_{DM}	125	W
T_J	150	°C
R_{JC}	1	°C/W
R_{CA}	79	°C/W

Tab. 57: PSpice Model Editor tranzistoru IRF740



Obr. 18: Pouzdro TO220 [22]

První sledovanou veličinou je maximální provozní hodnota proudu jdoucí do drainu tranzistoru.

I_D	Average	Peak
M1	9 %	290 %
M2	3 %	293 %
M3	3 %	293 %
M4	9 %	290 %

Tab. 58: Naměřený proud I_D na tranzistorech M1 – M4

Střední hodnota proudu se nachází ve velmi dobrých hodnotách (tab. 58). Hodnota špičková značně převyšuje katalogovou hodnotu 10 A. Naměřená maximální hodnota je 23,42 A. Nahlédnutím do katalogového listu tranzistoru [22] je patrné že maximální špičkový dovolený proud do drainu je 40 A. Kvůli tomuto poznatku lze hodnotu naměřeného přesahu zanedbat.

Další pětice porovnávaných parametrů je maximální:

proud gatu I_G , napětí drain – gate V_{DG} , napětí drain – source V_{DS} , kladné napětí gate – source V_{GSF} a záporné napětí gate – source V_{GSR} . Dle výpisu Smoke analýzy v tab. 59 ukazuje, že všechny hodnoty nevykazují žádnou zvětšenou hodnotu nad 90 % a není důležité se jimi více zabývat.

	I_G Average	V_{DG} Peak	V_{DS} Peak	V_{GSF} Peak	V_{GSR} Peak
M1 – M4	0 %	13 %	15 %	61 %	1 %

Tab. 59: Pětice porovnávaných hodnot na tranzistorech M1 – M4

Poslední porovnávanými hodnotami jsou maximální teplota přechodu T_J (tab. 60) a maximální ztrátový výkon P_{DM} (tab. 61). Při sledování tepelných hodnot lze pozorovat poměrně vyšší průměrnou hodnotu na přechodu T_J , která dosahuje až 73%. Vysoké špičkové hodnoty se zanedbají, protože špičková hodnota teploty nemůže vyskytnout na přechodu tranzistorů.

Střední hodnota ztrátového výkonu se nachází v docela vyšších hodnotách. Zarážející je hodnota efektivní, kterou Smoke analýza ukazuje jako maximální hodnotu také zásluhou standardního odlehčení, které je použito. Se zaměřením na porovnávané hodnoty, lze zjistit, že maximální hodnota je pro nás 1,5625 W a naměřená je 20,4526 W, tzn., že je zde překročena maximální hodnota téměř 13x. Aby se tato hodnota zvýšila, je zapotřebí změnit hodnotu tepelného odporu R_{CA} a navrhnout chladič.

T_J	Average	Peak
M1	73 %	236 %
M2	61 %	197 %
M3	61 %	197 %
M4	73 %	236 %

Tab. 60: Teplota přechodu na tranzistorech M1 – M4

P_{DM}	Average	RMS
M1	90 %	< MAX >
M2	71 %	< MAX >
M3	71 %	< MAX >
M4	90 %	< MAX >

Tab. 61: Ztrátový výkon na tranzistorech M1 – M4

Tepelný odpor R_{CA} bude vypočten pro maximální hodnotu ztrátového výkonu $P_{DM} = 25$ W.

$$\Delta T = (R_{JC} + R_{CA}) \cdot P_{DM} = T_J - T_A \quad (10)$$

Z rovnice (18) lze vyjádřit a vypočítat hodnotu R_{CA} jako:

$$R_{CA} = \frac{T_J - T_A}{P_{DM}} - R_{JC} = \frac{150 - 25}{25} - 1 = 4 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (11)$$

Z výpočtu vyplývá, že je zapotřebí navrhnout takový chladič, který má alespoň tepelný odpor 4 $^\circ\text{C/W}$, Může být použit stejný chladič, jež byl vypočítán pro stabilizátory U1 – U6 v bodě 2.2.8, vzorec č. 17, který má tepelný odpor 3 $^\circ\text{C/W}$.

2.3.7. Rezistor R1

Tento rezistor je rezistorem, který představuje společně s cívkou L1 zátěž, je na něm proto vysoký ztrátový výkon (tab. 62), jelikož je ve výchozím nastavení 1/4 W rezistor. Není divu, že Smoke analýza je v maximálních hodnotách. Pro odlehčení analýzy je zapotřebí navrhnout rezistor s velkou rezervou změnou hodnoty R_{MAX} v Property Editoru na 200 W.

R1	Average	Peak
P_{DM}	< MAX >	< MAX >
T_B	16994 %	20203 %

Tab. 62: Smoke analýza rezistoru R1.

2.3.8. Rezistory R2 – R5

Rezistory R2 – R5 jsou rezistory na řídicích zdrojích měniče. Při pohledu na jejich Smoke analýzu (tab. 63 a 64) lze si všimnout, že ztrátový výkon P_{DM} je na velmi nízkých hodnotách. Průměrná teplota u všech tranzistorů je na 13 %, což odpovídá nízkému ztrátovému výkonu. Jediná

P_{DM}	Average	RMS
R2 – R5	1 %	6 %

Tab. 64: Ztrátový výkon rezistorů R2 – R5

špičková teplota je na 115 % (tab. 63). Vzhledem k průměrné teplotě se rezistory nemůžou nikdy na takovou špičkovou teplotu zahřát. Pro eliminaci takto vysoké špičkové hodnoty v analýze je zapotřebí nastavit všechny čtyři rezistory se ztrátovým výkonem $R_{MAX} = \frac{1}{2} W$.

T_B	Average	Peak
R2 – R5	13 %	115 %

Tab. 63: Teplotní zatížení rezistorů R2 – R5

2.3.9. Druhé spuštění Smoke analýzy

•	Component	Parameter	Type	Rated Value	% Derating	Max Derating	Measured Value	% Max
✓	D1	VR	RMS	200	50	100	24.8459	25
✓	D1	TJ	Peak	175	100	175	32.6742	19
✓	D1	TJ	Average	175	100	175	25.0000	15
✓	D1	IF	Average	2	80	1.6000	440.8168n	1
✓	D1	IF	Peak	2	80	1.6000	4.0048m	1
✓	D1	PDM	Average	1.5000	75	1.1250	260.4435n	1
✓	D1	PDM	RMS	1.5000	75	1.1250	1.7459m	1
✓	D2	VR	RMS	200	50	100	42.9656	43
✓	D2	TJ	Peak	175	100	175	36.5003	21
✓	D2	TJ	Average	175	100	175	25.0008	15
✓	D2	IF	Average	2	80	1.6000	208.9215n	1
✓	D2	IF	Peak	2	80	1.6000	3.5119m	1
✓	D2	PDM	Average	1.5000	75	1.1250	7.6778u	1
✓	D2	PDM	RMS	1.5000	75	1.1250	1.9372m	1
✓	D3	VR	RMS	200	50	100	42.9656	43
✓	D3	TJ	Peak	175	100	175	36.5003	21
✓	D3	TJ	Average	175	100	175	25.0008	15
✓	D3	IF	Average	2	80	1.6000	208.9215n	1
✓	D3	IF	Peak	2	80	1.6000	3.5119m	1
✓	D3	PDM	Average	1.5000	75	1.1250	7.6778u	1
✓	D3	PDM	RMS	1.5000	75	1.1250	1.9372m	1
✓	D4	VR	RMS	200	50	100	24.8459	25
✓	D4	TJ	Peak	175	100	175	32.6742	19
✓	D4	TJ	Average	175	100	175	25.0000	15
✓	D4	IF	Average	2	80	1.6000	440.8168n	1
✓	D4	IF	Peak	2	80	1.6000	4.0048m	1
✓	D4	PDM	Average	1.5000	75	1.1250	260.4435n	1
✓	D4	PDM	RMS	1.5000	75	1.1250	1.7459m	1
✓	L1	LI	Peak	2	90	1.8000	1.0254	57
✓	L1	LI	RMS	2	90	1.8000	940.4508m	53
✓	L1	LV	RMS	75	90	67.5000	20.3331	31
✓	L1	LI	Average	2	90	1.8000	512.4381m	29
✓	L1	LV	Average	75	90	67.5000	22.6321m	1
✓	M1	TJ	Peak	150	100	150	94.1465	65
✓	M1	PDM	RMS	31.2500	75	23.4375	20.7524	89
✓	M1	VGSF	Peak	20	100	20	12.0008	61
✓	M1	TJ	Average	150	100	150	29.1927	20
✓	M1	VDS	Peak	400	90	360	50.4178	15
✓	M1	VDG	Peak	400	100	400	50.3128	13
✓	M1	ID	Average	10	80	8	715.6136m	9
✓	M1	PDM	Average	31.2500	75	23.4375	1.0482	5
✓	M1	VGSF	Peak	20	100	20	1.3176m	1
✓	M1	IG	Average	500n	100	500n	-49.7882n	0
✓	M2	TJ	Peak	150	100	150	91.2356	61
✓	M2	PDM	RMS	31.2500	75	23.4375	20.4526	88
✓	M2	VGSF	Peak	20	100	20	12.0007	61
✓	M2	TJ	Average	150	100	150	28.2901	19
✓	M2	VDS	Peak	400	90	360	50.4177	15
✓	M2	VDG	Peak	400	100	400	50.3179	13
✓	M2	PDM	Average	31.2500	75	23.4375	822.5329m	4
✓	M2	ID	Average	10	80	8	203.1782m	3
✓	M2	VGSF	Peak	20	100	20	1.3635m	1
✓	M2	IG	Average	500n	100	500n	-18.7966n	0
✓	M3	TJ	Peak	150	100	150	91.2356	61
✓	M3	PDM	RMS	31.2500	75	23.4375	20.4526	88
✓	M3	VGSF	Peak	20	100	20	12.0007	61
✓	M3	TJ	Average	150	100	150	28.2901	19
✓	M3	VDS	Peak	400	90	360	50.4177	15
✓	M3	VDG	Peak	400	100	400	50.3179	13
✓	M3	PDM	Average	31.2500	75	23.4375	822.5329m	4
✓	M3	ID	Average	10	80	8	203.1782m	3
✓	M3	VGSF	Peak	20	100	20	1.3635m	1
✓	M3	IG	Average	500n	100	500n	-18.7966n	0
✓	M4	TJ	Peak	150	100	150	94.1465	65
✓	M4	PDM	RMS	31.2500	75	23.4375	20.7524	89

2. Použití Smoke analýzy

•	Component	Parameter	Type	Rated Value	% Derating	Max Derating	Measured Value	% Max
✓	M4	VGSR	Peak	20	100	20	1.3176m	1
✓	M4	IG	Average	500n	100	500n	-49.7882n	0
✓	R1	PDM	RMS	200	35	71.5851	44.8453	63
✓	R1	PDM	Average	200	36	72.9006	42.4535	59
✓	R1	TB	Peak	200	100	200	75.4741	38
✓	R1	TB	Average	200	100	200	67.4535	34
✓	R2	TB	Peak	200	100	200	127.1198	64
✓	R2	TB	Average	200	100	200	25.1225	13
✓	R2	PDM	RMS	500m	47	237.3036m	6.0388m	3
✓	R2	PDM	Average	500m	48	240.4566m	306.2449u	1
✓	R3	TB	Peak	200	100	200	127.1198	64
✓	R3	TB	Average	200	100	200	25.1227	13
✓	R3	PDM	RMS	500m	47	237.2984m	6.0484m	3
✓	R3	PDM	Average	500m	48	240.4563m	306.7311u	1
✓	R4	TB	Peak	200	100	200	127.1198	64
✓	R4	TB	Average	200	100	200	25.1227	13
✓	R4	PDM	RMS	500m	47	237.2984m	6.0484m	3
✓	R4	PDM	Average	500m	48	240.4563m	306.7311u	1
✓	R5	TB	Peak	200	100	200	127.1198	64
✓	R5	TB	Average	200	100	200	25.1225	13
✓	R5	PDM	RMS	500m	47	237.3036m	6.0388m	3
✓	R5	PDM	Average	500m	48	240.4566m	306.2449u	1

Tab. 65: Druhé spuštění Smoke analýzy – výběr hodnot do 100%

•	Component	Parameter	Type	Rated Value	% Derating	Max Derating	Measured Value	% Max
✓	L1	LV	Peak	75	90	67.5000	98.1559	146
✓	M1	ID	Peak	10	80	8	23.1343	290
✓	M2	ID	Peak	10	80	8	23.4168	293
✓	M3	ID	Peak	10	80	8	23.4168	293
✓	M4	ID	Peak	10	80	8	23.1343	290

Tab. 66: Druhé spuštění Smoke analýzy – výběr hodnot nad 101%

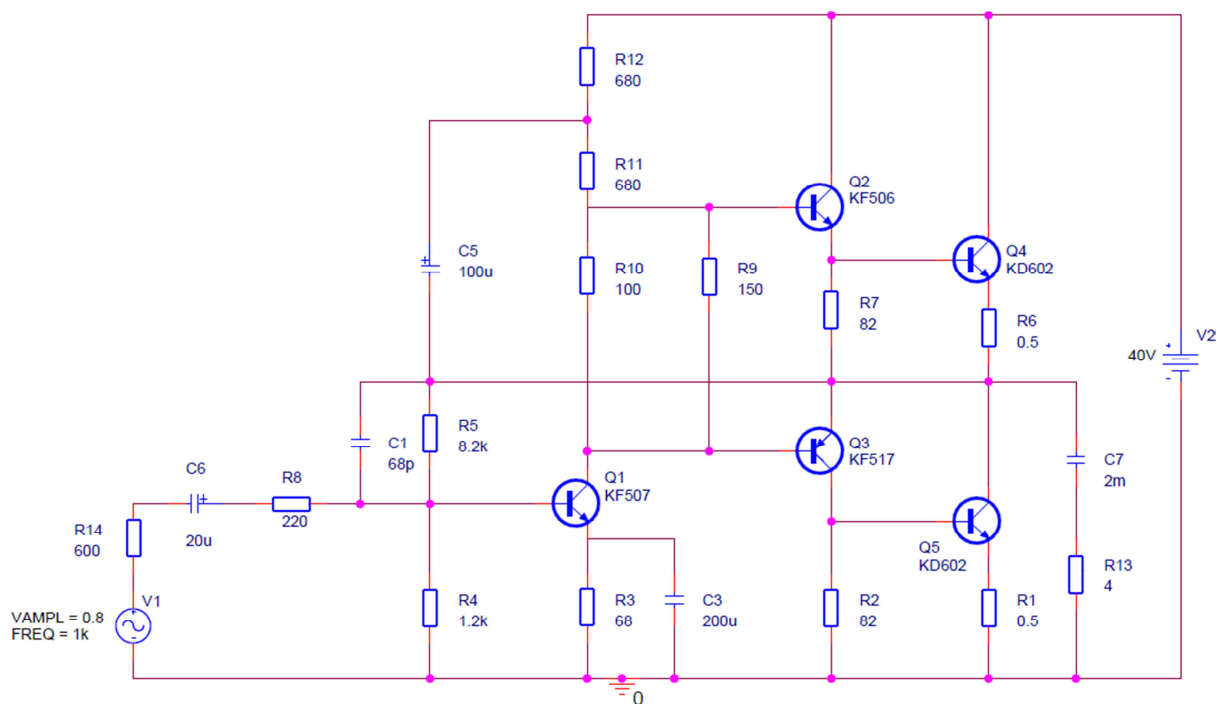
Při druhém spuštění Smoke analýzy je patrné značné snížení namáhání součástek (tab. 65). Zbylo akorát pět špičkových parametrů, které jsou namáhány přes 101 % (tab. 66). Jedná se o špičkové napětí na zátěži cívky L1, které je zanedbané z důvodu, že je špičkové naměřené napětí dáváno do poměru s maximální provozní hodnotou. Dalším parametrem je špičkový proud I_D na MOSFET tranzistorech M1 – M4. Tento proud je dán do poměru rovněž s maximálními provozními parametry tranzistoru. Skutečný maximální špičkový proud je $I_D = 40$ A, proto lze tyto překročené parametry ignorovat.

3. Laboratorní úloha: Aplikování Smoke analýzy

Laboratorní úloha je vytvořena jako vzorový příklad pro řešení problematiky Smoke analýzy. Pro laboratorní práci je použité zapojení pětadvacetiwattového zesilovače (obr. 19). Pro tento zesilovač je nezbytný zdroj s napětím 40 V, který je schopen dodat proud až 2,5 A. Tranzistory Q1 až Q5 jsou křemíkové tranzistory a tvoří přímou vázanou pětici. Vstupní tranzistor pracuje v zapojení se společným emitorem. V emitoru je zapojen obvyklý stabilizační obvod R3, C3; báze je napájena z výstupu zesilovače přes rezistor R5, čímž vzniká poměrně silná záporná zpětná vazba, která stabilizuje pracovní bod zesilovače. Tato vazba se uplatňuje i pro střídavou složku. Přebesnění je zapojeno paralelně kondenzátor C1, který fázově koriguje obvod zpětné vazby a brání rozkmitání zesilovače při nadzvukových kmitočtech. Rezistor R8 upravuje vstupní citlivost zesilovače a ovlivňuje též jeho vstupní impedanci. Zesilovač pracuje ve třídě AB s dvojicí koncových výkonných tranzistorů KD602. [23]

Zapojení s výkonnými koncovými tranzistory dává prostor pro zatížení součástek v obvodu a opodstatněná tvorba protokolu pro Smoke analýzu. Vyhodnocení by mělo obsahovat výkonové navržení pasivních součástek a výpočet chlazení tranzistorů KD602. Správnou funkci obvodu zajistí přidání externí knihovny TESLA.lib, která je vytvořena za katalogových údajů jednotlivých použitých součástek [24], [25]

Laboratorní úloha je umístěna v příloze jako vzorový protokol.



Obr 19: Schéma zapojení zesilovače.

Závěr

Výsledkem této bakalářské práce je seznámení se s funkcí a principy Smoke analýzy v prostředí OrCAD/PSpice, její aplikace pro řešení namáhání součástek pro daný elektrický obvod. Analýza je důležitá z praktického hlediska k navržení parametrů součástek pro praktickou realizaci daného obvodu. Pomůže navrhnout napěťové hodnoty kondenzátorů, ztrátový výkon u rezistorů, proudové zatížení u cívek a transformátorů. Také můžeme změnou tepelného odporu navrhnout chlazení u aktivních i pasivních součástek.

V první části této bakalářské práce získáme přehled o všech hlavních analýzách i doplňkových, které na nich závisí. Je důležité si uvědomit tyto návaznosti i při práci se Smoke analýzou, protože i ta je závislá na analýze v časové oblasti – Transient. Její nastavení přímo ovlivňuje průběh vyhodnocení Smoke analýzy.

Ve druhé části již aplikuji využití analýzy na dvou obvodech. První je síťový stabilizovaný zdroj, jehož výstupem je šest větví ($\pm 5\text{ V}$, $\pm 12\text{ V}$ a $\pm 15\text{ V}$). Každá větev je dimenzována na maximální proud o velikosti 1 A. Tímto proudem mohou být zatíženy všechny větve v jednom okamžiku. Z toho důvodu je proveden návrh a volba chladičů pro jednotlivé stabilizátory pomocí Smoke analýzy. Dalším příkladem je čtyřkvadrantový pulzní DC/DC měnič, ve kterém jsou použity MOSFET tranzistory. I zde je nutné navrhnout chlazení použitých tranzistorů a zvolit tomu odpovídající parametry některých pasivních součástek.

Ve třetí části je vyhotovena laboratorní úloha, která je k nahlédnutí v příloze této bakalářské práce. Jedná se o vypracovaný laboratorní protokol se zadáním a postupem, který může být použit jako vzorový příklad použití Smoke analýzy předmětech zabývajících se modelováním, návrhem, konstrukcí a simulací elektronických systémů v bakalářském a navazujícím studiu v rámci oboru Elektronika vyučovaném na VŠB-TU v Ostravě.

Seznam použité literatury

- [1] KOLKA, Zdeněk. Analýza elektronických obvodů programem OrCAD PSpice. VUT BRNO. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z <http://user.unob.cz/biolek/vyukaVUT/skripta/PSPICE.pdf>
- [2] Smoke Analysis. ORCAD. [online]. 2015. vyd. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.orcad.com/resources/library/smoke-analysis>
- [3] PSpice® Advanced Analysis User's Guide. CADENCE. [online]. 2006. vyd. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4827/spice/pspice/pspaugca.pdf>
- [4] COATES, Eric. Resistor Parameters. LEARNABOUT. [online]. 2013. vyd. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.learnabout-electronics.org/resistors_10.php
- [5] Vishay. [online]. 2015. vyd. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/>
- [6] ESR Values for Electrolytic Caps. EEVBLOG. [online]. 2015. vyd. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.eevblog.com/forum/beginners/esr-values-for-electrolytic-caps/>
- [7] Aluminum Electrolytic Capacitor Application Guide. CDE. [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.cde.com/resources/catalogs/AEappGUIDE.pdf>
- [8] 1N4001 - 1N4007. VISHAY GENERAL SEMICONDUCTOR. [online]. 2011. vyd. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/88503/1n4001.pdf>
- [9] TIC106M. INCHANGE SEMICONDUCTOR. [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.ges.cz/sheets/t/tic106m_isc.pdf
- [10] BC547-AP. MCC MICRO COMMERCIAL COMPONENTS. [online]. 2010. vyd. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/284/BC547-AP-pdf.php>
- [11] BC546 - BC548. VISHAY SEMICONDUCTORS. [online]. 2004. vyd. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.ges.cz/sheets/b/bc546_48.pdf
- [12] BF245. FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. [online]. 2003. vyd. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.ges.cz/sheets/b/bf245_fai.pdf
- [13] BF245. NXP SEMICONDUCTORS. [online]. 1996. vyd. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BF245A-B-C.pdf
- [14] IRF520. INTERNATIONAL RECTIFIER. [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.ges.cz/sheets/i/irf520_ir.pdf
- [15] IRF520. SGS THOMSON MICROELETRONICS. [online]. 1993. vyd. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.futurlec.com/Transistors/IRF520.shtml>
- [16] BUP203. SIEMENS. [online]. 1995. vyd. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/infineon/1-bup203.pdf>

- [17] EHR Series. HITANO ENTERPRISE CORP. [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/123/341/ce-4700u-35vt-hit-ehr-18x36-rm7-5-bulk-datasheet-1.pdf>
- [18] BYW29–200. ON SEMICONDUCTOR. [online]. 2005. vyd. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.ges.cz/sheets/b/byw29_200.pdf
- [19] BYW29–200. PHILIPS SEMICONDUCTORS. [online]. 1994. vyd. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/sheets/b/byw29.pdf>
- [20] CHL37B. GME. [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/chl37b-p072-450>
- [21] TO-220BH. GME. [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/silikonova-teplovodiva-podlozka-to-220bh-p621-038>
- [22] IRF740. SGS THOMSON MICROELECTRONICS. [online]. 1998. vyd. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXusxqs.pdf>
- [23] SVOBODA, Jiří. Stavebnice tranzistorových zesilovačů a přijímačů. Druhé, upravené a doplněné vydání. Praha: SNTL, 1975, 60 - 65.
- [24] TESLA ROŽNOV POD RADHOŠTĚM. *Křemíkové výkonové tranzistory*. 1986.
- [25] TESLA ROŽNOV POD RADHOŠTĚM. *Příruční katalog elektronek, obrazovek a polovodičových součástek*. 1977.